



**Bachelorarbeit des Studiengangs  
Augenoptik und Hörakustik**

---

Stephanie Kostial

**Subjektive  
Unschärfegrenzen  
bei Gleitsichtgläsern**

Betreuer: Prof. Dr. Peter Baumbach

Zweitbetreuer: Prof. Dr. Jürgen Nolting

---

# **Subjektive Unschärfegrenzen bei Gleitsichtgläsern**

**Messung von Sehbereichsbreiten bei Gleitsichtgläsern über  
Unschärfemarkierungen**

Zugelassene Abschlussarbeit des Studiengangs Augenoptik und Hörakustik  
zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

vorgelegt von  
Stephanie Kostial

Tag der Einreichung:

15.04.2015

Fakultät Augenoptik und Hörakustik  
Hochschule Aalen

## Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorthesis selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine andere als die angegebene Literatur benutzt habe. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehenden Ausführungen meiner Arbeit sind besonders gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

Diese Abschlussarbeit entstand in Wintersemester 2014/15 im Studiengang Augenoptik/ Augenoptik und Hörakustik an der Hochschule Aalen in Zusammenarbeit mit meinem betreuenden Professor Dr. Peter Baumbach. Ihm verdanke ich die mühevollen Berechnung der speziellen Gleitsichtgläser und Programmierung des *Blurtest*, ohne die meine Studie nicht möglich gewesen wäre.

Besonderer Dank gilt auch den Probanden, die sich für einen Zeitraum von über 6 Wochen für sämtliche Messungen, Fragebogen und Fotoaufnahmen zur Verfügung gestellt haben.

15.04.2015, Stephanie Kostial

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung .....</b>	<b>II</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>Formelzeichen .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Ziele der Arbeit.....	1
1.3 Material und Methoden .....	2
1.3.1 Einverständniserklärung und Probanden Information.....	2
1.3.2 Anamnesebogen .....	2
1.3.3 Probanden.....	4
1.3.4 Pretest.....	5
1.3.4.1 Aufbau .....	5
1.3.4.2 Unschärfekriterien .....	6
1.3.5 Blurtest .....	7
1.3.5.1 Programm.....	7
1.3.5.2 Vorlagen .....	9
1.3.5.3 Testgläser.....	10
1.3.5.4 Unschärfekriterien .....	13
1.3.5.5 Ablauf der Messung.....	14
1.3.5.6 Reproduzierbarkeit .....	15
<b>2 Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>17</b>
2.1 Zahlen und Fakten für dioptrisches Unschärfeempfinden.....	17
2.2 Einflussfaktoren .....	23
<b>3 Ergebnisse und Auswertung.....</b>	<b>26</b>

---

3.1	Pretest und individuelle Toleranzbereitschaft bei unscharfen Texten .....	26
3.2	Blurtest	28
3.3	Selbstbewertung Toleranzbreiten (Introspection) .....	35
3.4	Reproduzierbarkeit.....	36
3.4.1	Proband 1 .....	37
3.4.2	Proband 4.....	41
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>56</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>XVI</b>

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\Delta A_{\max}$	dpt	maximaler Flächenastigmatismus
2x	mm	Progressionsbreite Gleitsichtglas
A	dpt	Astigmatismus in Gebrauchsstellung
a	mm	Beobachtungsabstand zwischen Objekt und Glas
Add	dpt	Addition/ Nahzusatz
b	mm	Blickfeldbreite
C	$\mu\text{m}$	Aberrationskoeffizient
$E_v$	lux	Beleuchtungsstärke
$e_z$	mm	Abstand Augendrehpunkt zur Hornhaut
HSA	mm	Hornhautscheitelabstand
$l_{PZ}$	mm	Länge der Progressionszone
$L_v$	$\text{cd}/\text{m}^2$	Leuchtdichte
PD	mm	Pupillendistanz
$V_{cc}$	-	Visus cum correctione/ Sehleistung mit Korrektur
$V_{\log\text{MAR}}$	-	Logarithmische Darstellung des kleinsten auflösbaren Seh winkels

## Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
ANOVA	Analysis of Variance
F	Prüfgröße (ANOVA)
L	linkes Auge
n	Anzahl (Probanden, Testwerte u.a.)
Ø	mittlerer Durchschnittswert
PAL	Progressiv Addition Lens
pt	Abkürzung für DTP (Desktop Publishing), Maß für Schriftgrad
p-Wert	Signifikanzwert
px	Pixel / Bildpunkt
PZ	Progressionszone
R	rechtes Auge
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
RMS	Root Mean Square
$\sigma$	Standartabweichung



## Abstract

**Zweck:** Das Ziel dieser Studie ist es die Wahrnehmung und Akzeptanz von Unschärfe beim seitlichen Blick durch ein Gleitsichtglas zu untersuchen. Mit dem *Blurtest* sollte eine geeignete Methode zur Messung von Sehbereichsbreiten bei Gleitsichtgläsern entwickelt und verifiziert werden.

**Material/Methoden:** Die horizontalen Sehbereichsbreiten von vier Gleitsichtgläsern unterschiedlicher Progressionskanalbreite (2, 3, 4 und 5 mm) und linearem Wirkungsanstieg sollten bei einem Beobachtungsabstand von 40 cm für drei Unschärfekriterien gemessen werden. Die Grenzen für *bemerkbare*, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe* werden für einen am Bildschirm dargebotenen sinnfreien Text in Schriftgrad 9 pt (Visus = 0,4) links und rechts des monokularen Blickfelds markiert. Zusätzlich sollte in einem Vortest (*Pretest*) nach diesen Kriterien verschwommener, gedruckter Text beurteilt werden.

**Ergebnisse:** Die Grenzen für *eben bemerkbare*, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe* liegen bei einem Astigmatismus in Gebrauchsstellung von  $0,70 \pm 0,3$  dpt,  $1,37 \pm 0,50$  dpt und  $2,06 \pm 0,74$  dpt bei einem natürlichen Pupillendurchmesser von durchschnittlich 3,37 mm. In 40 % der Fälle unterscheiden sich die Grenzen für Unschärfe innerhalb eines Probanden nicht signifikant. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Toleranzbereitschaft unscharfe Texte in Alltagssituationen zu lesen und der Beurteilung von modifiziertem, gedrucktem Text.

**Fazit:** Die markierten Sehbereichsbreiten korrelieren mit dem horizontalen Anstieg des unerwünschten Astigmatismus, lassen sich bei Wiederholungsmessungen am *Blurtest* jedoch nicht auf  $\leq 2^\circ$  Schwankungsbreite reproduzierbar nachweisen. Die Definition, Wahrnehmung und Toleranz von Unschärfe in verschiedenen Alltagssituationen hängen von individuellen Erfahrungswerten und gesetzten Anspruch an Seh- bzw. Leseleistungen ab.

**Schlüsselwörter:** Unschärfetoleranz, Gleitsichtgläser, Astigmatismus, Blurtest, Pretest

**Purpose:** The aim of this study was to investigate the perception and acceptance of blur in peripheral vision at Progressiv Addition Lenses (PAL). The *Blurtest* should be developed and verified as a suitable method for measuring the visual field in PAL`s.

**Methods:** The horizontal field of vision of four different PAL`s with a progressive corridor of 2, 3, 4 and 5 mm and a linearly increase of power were measured for three different criteria of blur in a distance of 40 cm. The limits of *noticeable*, *tolerable* and *not acceptable blur* were marked for a nonsense text with a letter size of 9 pt ( $V = 0.4 \log\text{MAR}$ ) left and right of the monocular field of view. In addition the subjects had to evaluate blurred, printed text for these criteria of blur.

**Results:** The limits of *noticeable*, *tolerable* and *not acceptable blur* are at an astigmatism value of  $0.65 \pm 0.27$  D,  $1.16 \pm 0.36$  D and  $1.64 \pm 0.48$  D with a natural pupil size between 3.0 and 3.5 mm. In 40 % of cases the limits of blur are significant not different for each subject. There is a correlation between willingness of tolerance to read blurred texts in everyday life and evaluation of blurred, printed text.

**Conclusion:** The marked fields of view correlate with the horizontal increasing of unwanted astigmatism, but repeatability of visual angle with variation  $\leq 2^\circ$  cannot be detected with the *Blurtest*. The definition, perception and tolerance of blur in workday situations depend on individual experiences and standard of vision and reading performance.

**Keywords:** Tolerance of blur, PAL`s, Astigmatism, Blurtest, Pretest

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Gleitsichtgläser stellen im Alltag eine universelle Alternative zur einzelnen Fern-, Computer- und Nahbrille dar, da bei diesem multifokalen Glas alle Entfernungen abgedeckt sind. Mit dem speziellen Flächendesign gehen jedoch auch Einschränkungen im Blickfeld einher, besonders im Übergangsbereich von Ferne zur Nähe: dem Zwischenbereich, der für PC-Distanzen genutzt wird. Durch den stetigen Anstieg der Werte von Ferne zur Nähe werden zusätzlich unerwünschte Unschärfebereiche (Flächenastigmatismus) induziert, die zur Peripherie des Glases hin zunehmen und ein deutliches Erkennen von Buchstaben oder Gegenständen erschweren.

Unter der Vorgabe einen maximalen Grenzwert von 0,5 dpt Flächenastigmatismus nicht zu überschreiten (Presser 2001, S. 203), können die nutzbaren Sehbereichsbreiten mit dem Satz von Minkwitz für Ferne, Mitte und Nähe als Zahlenwert berechnet werden (Minkwitz 1963, Kalder 2003;). Doch für welche Sehansprüche gilt dieser Grenzwert? Und ist es der tatsächliche Grenzwert für einen Bereich klaren komfortablen Sehens in dem über längeren Zeitraum Lese- und Arbeitsleistung möglich ist? Mit der Lösung dieser Fragestellung soll sich die Studie beschäftigen.

## 1.2 Ziele der Arbeit

Es sollte eine Methode zur Messung von Sehbereichsbreiten in Gleitsichtgläsern entwickelt werden, deren Aussagewert verlässlich und wiederholbar ist. Der Übergang von *scharf* zu *unscharf* stellt in Gleitsichtgläsern, bedingt durch den Anstieg des Flächenastigmatismus zur Peripherie des Glases hin, einen fließenden Prozess dar. Die Wahrnehmung und Auflösung von Texten oder Objekten beim seitlichen Blick durch ein Gleitsichtglas schlägt nicht ab einem bestimmten Punkt von lesbar auf nicht mehr lesbar um. Es sollen definierte Kriterien eingesetzt werden, welche die Beurteilung des *scharfen* und *unscharfen* Bereichs vereinfachen und eingrenzen. Ziel war es, die Vorlagen für die Beurteilung möglichst realitätsnah zu wählen um später Schlussfolgerungen verallge-

meinern zu können. Dabei spielt die Lesefähigkeit von Wörtern eine höhere Rolle als das bloße Erkennen oder nicht Erkennen des kleinsten wahrnehmbaren Punktabstands. „Das Lesen ist aber ein sehr komplexer Vorgang, bei dem Formensinn und die Übung eine mindestens genauso große Rolle spielen wie die eigentliche Sehschärfe“ (Diepes 2004, S. 60) Orientierungen an wiederholt erscheinenden Wörtern sinnhafter Texte gilt es jedoch zu vermeiden, da ein Lerneffekt den Aussagewert der Wiederholbarkeit beeinflusst.

Die Methode soll an Probanden mit und ohne Brille durchzuführen sein. Durch eine geeignete Testanordnung soll die Reproduzierbarkeit der markierten Sehbereichsbreiten auf  $2^\circ$  maximiert werden. Zudem soll ein Zusammenhang zwischen den als *scharf* bzw. *lesbar* markierten Breiten der Vorlage mit dem horizontalen Anstieg des Flächenastigmatismus untersucht werden.

### **1.3 Material und Methoden**

#### **1.3.1 Einverständniserklärung und Probanden Information**

Vor jeder Messung werden die Probanden schriftlich über Zweck, Teilnahmevoraussetzung und Durchführung der Studie aufgeklärt. In einer Probandeninformation werden die Kriterien zur Unschärfebeurteilung, Anzahl der Messungen und mögliche Sicherheitsvorkehrungen detailliert beschrieben. Die Probanden haben jederzeit die Möglichkeit, Fragen zu stellen, um sicher zu gehen, dass die Merkmale der jeweiligen Unschärfekriterien beim *Pretest* und *Blurtest* richtig verstanden und umgesetzt werden können. Die *Schriftliche Einverständniserklärung der Testperson zur Teilnahme an einer wissenschaftlichen Studie* und *Information für Probanden* befinden sich im Anhang.

#### **1.3.2 Anamnesebogen**

Neben personenbezogenen Daten werden bei der Anamnese auch Fragen zur Art der Korrektur der Fehlsichtigkeit, Erfahrungen mit Mehrstärken- bzw. Gleitsichtbrillen, Tätigkeit/Beruf und die damit zusammenhängende

vorwiegende Arbeitsdistanz gestellt. Da diese Studie nur Probanden im Alter von unter 30 Jahren untersucht, ist die Frage nach Gleitsichterfahrungen hinfällig; der Anamnesebogen dient jedoch als Vorlage für weitere Studien mit presbyopen Probanden. Wie bei Woods et al. 2010 wird in dieser Studie ein sogenannter *Introspection score*, dh. eine Selbstbewertung unter Einbezug eigener Empfindung und Toleranzgrenzen bezüglich Unschärfe ermittelt. Die erste Introspection-Frage bezieht sich auf den *Pretest* (siehe 1.3.4), wobei 12 Karten mit modifiziertem Text nach den jeweiligen Unschärfekriterien beurteilt werden sollen. Die zweite Frage bezieht sich auf die Toleranzspanne, in Bezug auf die Bereitschaft in verschiedenen Alltagssituationen unscharfe oder verschwommene Wörter lesen zu können. Beurteilt werden Situationen wie Bücher lesen, PC-Arbeit, Anzeigetafeln lesen (z.B. im Bus) und Fernsehtexte lesen. Die Bewertung erfolgt auf einer Skala („grading scale“) von 0 bis 5, wobei 0 sehr gering und 5 sehr groß bedeutet.

Die dritte Frage wird nach den Unschärfemessungen beim *Blur Test* mit den jeweiligen Glastypen 1 bis 4 mit unterschiedlich breiten Progressionskanälen gestellt. Woods definiert den Bereich zwischen *eben bemerkbarer* und *störender Unschärfe* als *Toleranzbereich* und kann einen Zusammenhang zwischen gemessener und gefühlter Differenz zwischen den beiden Einstellungspunkten nachweisen (Woods et al. 2010). Ob dieser Zusammenhang von sphärischem Defokus auf Unschärfeempfinden bei Gleitsichtgläsern zu übertragen ist, soll mit der gleichen Fragestellung getestet werden. Dabei werden die Probanden gebeten, folgende Frage auf einer Skala von 0 bis 5 zu bewerten: *Wie groß, denken Sie, war der Unterschied in den Markierungseinstellungen zwischen dem Kriterium 1 „gerade bemerkbare Unschärfe“ und dem Kriterium 3 „unakzeptable Unschärfe“ bei den jeweiligen Test-Gläsern 1-4?* Die Skalenbewertung 0 bis 5 hat die gleiche Bedeutung wie bei Frage 1: 0= sehr gering und 5= sehr groß.

Der *Anamnesebogen* befindet sich im Anhang.

### 1.3.3 Probanden

Die Studie wird mit fünf Probanden (3 weiblich, 2 männlich) im Alter von 22 bis 27 Jahren durchgeführt. Alle werden einer Voruntersuchung zur Eignung unterzogen, um sicher zu stellen, dass alle die gleichen Voraussetzungen erfüllen; darunter subjektiver Refraktion mit Sehleistungsprüfung, Motilitätstest zur Überprüfung der freien Augenbewegung und Fragen zu ophthalmologischen Vorerkrankungen (siehe auch 1.3.2). Nur rechtsichtige bzw. mit Kontaktlinsen vollkorrigierte Personen ohne Augenerkrankungen mit einer Sehleistung (monokular) gleich oder besser als 1,0 sowie uneingeschränkter Augenbewegung sind für die Studie geeignet. Bei Probemessungen stellt sich heraus, dass nur Probanden mit rotationssymmetrischen Kontaktlinsen an der Studie teilnehmen können. Eine Testperson mit torischer Kontaktlinsenkorrektur gibt an, starke Sehschwankungen und Probleme beim Beurteilen zu haben; vermutlich verlieren torische Kontaktlinsen ihre Stabilisation der Achslage bei extremen Augenbewegungen zur Seite. Die Messungen werden zwar in der Nähe (40 cm Beobachtungsabstand) für einen Visusanspruch von 0,4 durchgeführt; es sollte jedoch ein normal entwickeltes visuelles System und damit zusammenhängend der Erfahrungswert von abgespeicherten Informationen zu *klarem und deutlichem Sehen* bei gutem Visus in der Ferne vorausgesetzt sein. Keiner der Testpersonen gibt an, unter dem Einfluss von Medikamenten zu stehen. Die durchschnittliche monokulare Sehleistung liegt bei -0,161 logMAR, welche einem Visus zwischen 1,25 bis 1,6 entspricht. Die Korrektionswerte liegen im sphärischen Bereich zwischen +0,25 dpt bis -3,25 dpt. Nur eine Testperson ist im Alltag Kontaktlinsenträger und auch bei den Messungen mit Kontaktlinsen korrigiert (Proband 1 mit -3,25 dpt); alle anderen Probanden sind im Alltag unkorrigiert mit +0,25 dpt bis -0,5 dpt Fehlsichtigkeit. Mit einem Pupillometer (*PD 500, Mailshop*) wird vor den Messungen der Pupillenabstand sowie der Pupillendurchmesser gemessen, letztere durch die Abstandsmessung vom linken zum rechten Pupillenrand. Tabelle 1 zeigt die Übersicht mit Refraktionswerten, Sehleistung und Pupillenparametern. Die Pupillendurchmesser werden beim Blick auf den Bildschirm durch eine

Fotoaufnahme gemessen und ausgewertet. Es wird unter natürlichen Bedingungen ohne Medikamente zur Pupillenerweiterung gemessen; der durchschnittliche Wert der Pupillengröße liegt bei 3,37 mm (3,0 - 4,0 mm). Keiner der Personen gibt an, Erfahrungen mit Gleitsichtbrillen zu haben. Getestet wird jeweils das rechte Auge; das Linke wird mit einem Abdeckglas okkludiert. Die Beleuchtung im Raum beträgt durchschnittlich 410 lux (*Data Logger Light Meter, PCE-174, PCE Group*).

**Tabelle 1: Refraktionswerte, Sehleistung und Pupillenparameter der Probanden**

Proband-Nr.	Refraktions-Werte (Sphäre in dpt)		PD (mm)		ø Pupille (mm) <i>Blurtest</i>		Vcc		Vcc log MAR	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
1	-3,25	-3,25	29,5	30	3,0	3,0	1,25	1,25	-0,10	-0,10
2	0	0	30,5	33	3,0	3,0	1,25	1,25	-0,10	-0,10
3	-0,25	-0,25	34	32	4,0	4,0	1,60	1,60	-0,20	-0,20
4	-0,25	-0,25	30	30,5	3,5	3,5	1,60	1,60	-0,20	-0,20
5	+0,25	+0,25	29,5	32	k.A.	k.A.	1,60	1,60	-0,20	-0,20
<b>Mittelwert</b>					<b>3,37</b>	<b>3,37</b>	<b>1,25-1,6</b>	<b>1,25-1,6</b>	<b>-0,16</b>	<b>-0,16</b>

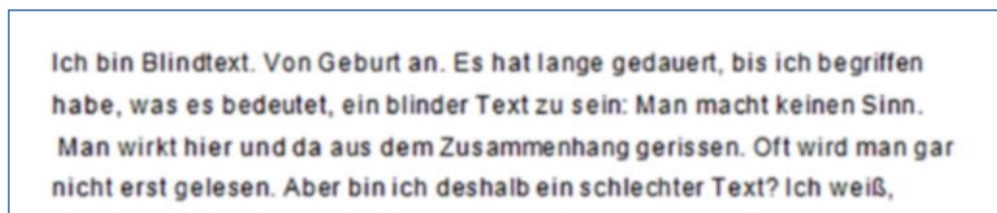
### 1.3.4 Pretest

Da *Unschärfe* ein Begriff ist, dessen Definition individuell unterschiedlich ausfallen kann, wurde versucht, durch einen Vortest (*Pretest*) das Verständnis für Unschärfetoleranz zu quantifizieren bzw. einen möglichen Zusammenhang zwischen auf Papier gedrucktem, modifiziert verschwommenen Text und unscharfem Text beim Blick seitlich durch ein Gleitsichtglas herzustellen.

#### 1.3.4.1 Aufbau

Mit dem Bildbearbeitungsprogramm *Photoshop CC* (Adobe Creative Cloud, Version 2014) wird ein Bild (Auflösung 768x768) mit sinnfreien *Blindtext*, Schriftart Arial und Schriftgröße 9 pt, schrittweise weichgezeichnet. Weichzeichner in der Bildbearbeitung „setzen die Bildschärfe unter Verwendung verschiedener Algorithmen herab“ (gimp.org); Unschärfe hingegen ist ein Maß zur Qualitätsbeurteilung von Bildern. Mit dem

Gauß'schen Weichzeichner wird versucht, eine dioptrische Unschärfe zu simulieren. Der Gauß'sche Weichzeichner wird auf jedes Pixel des markierten Bildes angewendet. Der Farbwert wird dabei auf den Mittelwert aller umliegenden Pixel in einem vorher festgelegten Radius gesetzt. Der Weichzeichnerradius wird in 0,25 Pixel Schritten vertikal und horizontal gleich erhöht, wobei der Text nach und nach weichgezeichnet wird. 12 Karten mit modifiziertem Text werden dabei erstellt; Radius 0,25 px – 3 px. Eine zusätzliche Karte diente als Referenzkarte ohne Modifizierung. Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt der Karte 3 mit einem Weichzeichnerradius von 1,0 px.



**Abbildung 1: Beispiel Pretest Vorlage mit 1,0 px Weichzeichnerradius**

In 40 cm Abstand bei einer Raumbeleuchtung von durchschnittlich 410 lux sollen die Probanden die Karte auswählen, bei der das jeweilige Kriterium von *bemerkbarer*, *tolerierbarer* und *unakzeptabler Unschärfe* erreicht ist. Die Abbildungen der modifizierten *Pretest* Vorlagen befinden sich im Anhang ab S. XXII.

#### **1.3.4.2 Unschärfekriterien**

Die modifizierten Karten sollen nach folgenden Kriterien beurteilt werden:

1. *gerade eben bemerkbare Unschärfe*: Die erste Veränderung in Klarheit und Schärfe der Buchstaben ist bemerkbar; die Buchstaben sollten immer noch flüssig lesbar sein.
2. *gerade noch tolerierbare Unschärfe*: Eine Modifizierung des Textes ist deutlich sichtbar. Es ist das Maß an Unschärfe erreicht, bei dem man die ersten (Lese-)Probleme durch den Mangel an Klarheit der Buchstaben



bekommt, es aber dauerhaft tolerierbar ist. Die Buchstaben sollten aber noch klar genug zum längerfristigen flüssigen Lesen sein.

3. *unakzeptable Unschärfe*: Es ist das Niveau an Unschärfe erreicht, bei dem man dauerhaft ablehnen würde, den Text lesen zu wollen. Die Unschärfe erreicht einen Punkt, an dem sie nicht mehr akzeptabel ist; die Buchstaben sind so verschwommen, dass sie nur noch mutmaßlich erkennbar sind oder nicht.

### 1.3.5 Blurtest

Der *Blurtest* stellt den Haupttest dar. Mit ihm wird versucht, eine Methode zu entwickeln und zu verifizieren, bei der man die Sehbereichsbreiten beim Blick durch ein Gleitsichtglas klar definieren und durch Prüfen auf Reproduzierbarkeit auf einen Blickwinkel mit einer Schwankungsbreite von 2° einschränken kann.

#### 1.3.5.1 Programm

Der *Blurtest* (Unschärfetest) wurde mit *Microsoft Visual C++* von Prof. Dr. P. Baumbach programmiert. Beim Aufruf des Programms muss vor der ersten Messung eine Kalibrierung durchgeführt werden um die Abstände der Marker zu den Bildschirmrändern dem jeweiligen Bildschirm, auf dem die Messungen durchgeführt werden, anzupassen. Die Maske des *Blurtests* ist in Abbildung 2 dargestellt.

**Messbereich**

☐ Ferne ☐ Mitte ☒ Nähe

**Proband**

neue Messung Probandennummer 1

**Testglas**

Nummer 2 Schriftgröße 9 Messung starten

**Ergebnisse**

Linker Rand -6,7 Grad  
Rechter Rand 6,7 Grad  
Breite 13,5 Grad

**Kalibrierung**

Abstand zwischen den Linien 0,152 Meter  
Beobachtungsabstand 0,40 Meter

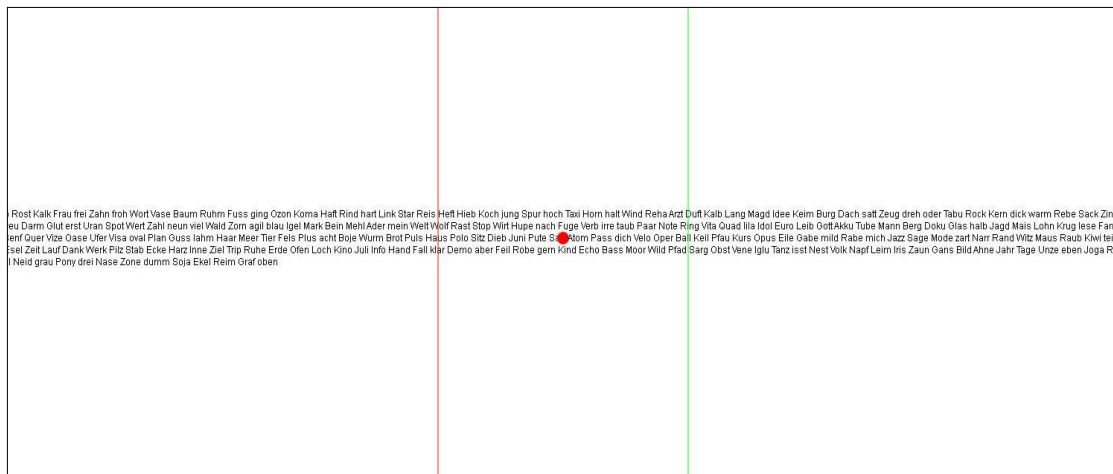
Anzahl der Textdateien 5

Bild anzeigen  
Schwarz

**Abbildung 2: Programmmaske *Blur Test***

Dabei müssen in der Programmmaske unter *Kalibrierung* der Abstand zwischen den beiden abgebildeten Linien manuell nachgemessen und aktualisiert sowie der *Beobachtungsabstand* von 0,4 m eingetragen werden. Die *Anzahl der Textdateien* gibt an, auf wie viele verschiedene Textdateien bei den Messungen zugegriffen wird. Um einen Lerneffekt oder Wiedererkennungswert ausschließen zu können, wird bei jeder Messung eine andere der fünf Vorlagen verwendet. Der *Messbereich* ist für die *Nähe* ausgelegt; bei *Proband* kann die Probandennummer eingetragen werden. Unter *Testglas* wird die Schriftgröße des Textblocks gewählt und die Nummer des jeweiligen Testglases eingetragen. Bei *Ergebnisse* sind die Abstände der jeweiligen Marker zum Fixationspunkt sowie der Gesamtwinkel in Grad nach der Messung angegeben. Auf einem 22" TFT-Flachbildschirm (*Dell UltraSharp 2208WFT, Auflösung: 1680 x 1050 Pixel*) mit einer Leuchtdichte von durchschnittlich 208 cd/m<sup>2</sup> (gemessen mit *Luminance Meter LS-100, Minolta Camera Co.LTD, Japan*) wird ein sinnfreier Textblock deutscher Wörter zu je vier Buchstaben in vier Zeilen mittig dargeboten. Im Zentrum des Textes ist ein roter Fixationspunkt und zwei senkrechte Linien einer Breite von 1mm rechts und links vom Fixationspunkt im Abstand von 9,5 cm. Der Textblock ist über eine Tastatur

mit den Buchstaben *D* (down) nach unten bzw. mit *U* (up) nach oben nachjustierbar. Die Linien dienen als Markierung für die empfundenen Unschärfegrenzen und sind visuell unterscheidbar, da der linke Marker, zur Markierung des Textes links vom Fixationspunkt rot und der rechte Marker, zur Markierung des Textes rechts vom Fixationspunkt, grün war (Abb 3). Der rote Marker ist über die Pfeiltaster der Tastatur nach *links* und *rechts* durch den Probanden steuerbar; der grüne Marker durch die Tastenkombination *strg* + *Pfeiltasten links* oder *rechts*. Berechnet wird der Abstand der Marker zum roten Fixationspunkt und daraus wiederum der monokulare Gesamtblickwinkel. Bei jeder neuen Messung sind die Markierungslinien wieder an ihrem Ausgangspunkt, um ein Orientieren an der vorherigen Einstellung zu vermeiden.



**Abbildung 3: Vorlage mit Fixationspunkt und Markern des *Blur Tests***

### 1.3.5.2 Vorlagen

Verwendet wird ein Pool aus 260 gängigen deutschen Wörtern zu je 4 Buchstaben sinnfreier Anordnung in serifenfreier Schrift (Arial). Gewählt wurde Schriftgröße 9 pt, welcher in 40 cm Abstand einem Visus von 0,4 entspricht. Zum Vergleich: Zum Lesen einer Zeitung ist eine Sehschärfe von 0,4 erforderlich; um eine Zeitung flüssigen lesen zu können, eine Lesesehschärfe von 0,7. 210 Wörter sind Substantive mit großem Anfangsbuchstaben, die restlichen 60 Wörter bestehen aus Kleinbuchstaben und sind Verben, Adverbien, Adjektive und Personalpronomen. Aus

diesem Pool werden 5 verschiedene Vorlagen mit randomisierter Anordnung der Wörter gefertigt um ein Lern- oder Wiedererkennungseffekt ausschließen zu können. Die Testvorlagen sind dem Anhang zu entnehmen (S.XXIV).

### 1.3.5.3 Testgläser

Als Halterung werden einzelne Messgläser (Metallschmalrandfassungen) der Firma *Schairer Ophthal Technik Stuttgart* verwendet, welche der DIN EN ISO 9801 (Ophthalmische Instrumente – Refraktionsgläser) entsprechen, einen Durchmesser von 38 mm haben und somit in jede genormte Messbrille passen. Als Testgläser werden vier spezielle berechnete Gleitsichtgläser mit linearem Wirkungsanstieg verwendet, so dass vertikal eine konstante Breite der Progressionskanäle ohne Insetverschiebung vorliegt. Die Berechnung der Testgläser wurde im Zusammenhang dieser Studie von Prof. Dr. Baumbach durchgeführt. Eine Übersicht der Blickfeldbreiten bei einem Beobachtungsabstand von 40 cm und Progressionskanalbreiten (PZ Breite 2x) bei den jeweiligen maximalen Flächenastigmatismen ( $\Delta A_{\max}$ ) ist in Tabelle 2 dargestellt. Die verwendeten Formeln zur Berechnung der Blickfeldbreite  $b$  und Progressionskanalbreite  $2x$  enthalten folgende Variablen (Kalder 2003) :

$$2x = \frac{\Delta A_{\max}}{Add} \times l$$

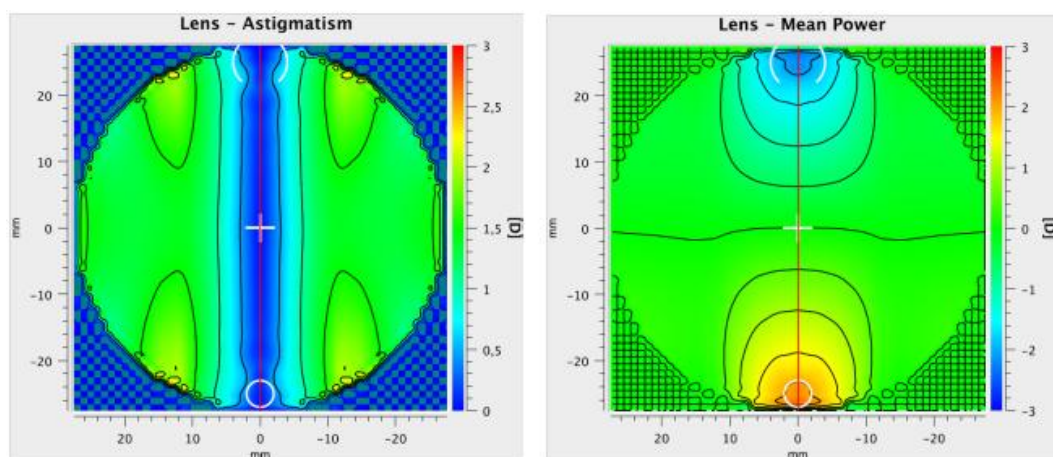
$$b = 2x \times \frac{(a + ez)}{(HSA + ez)}$$

- 2x = Progressionskanalbreite
- $\Delta A_{\max}$  = max. Flächenastigmatismus
- Add = Addition
- l = Länge Progressionskanal
- b = Blickfeldbreite
- a = Beobachtungsabstand
- HSA = Hornhautscheitelabstand
- ez = Abstand Hornhaut-Augendrehpunkt (13 mm)

Unter der Annahme, dass in Gebrauchsstellung ein Astigmatismus von 0,5 dpt nicht überschritten werden sollte (Kalder 2003; Presser 2001), sind Blickfeldbreiten für *bemerkbare* bzw. *tolerierbare Unschärfe* zwischen 59 mm und 147,5 mm zu erwarten. Berechnet sind die Parameter der Gleitsichtgläser und dazugehörigen Blickfeldbreiten mit einem festgelegtem Hornhautscheitelabstand von 15 mm, Augendrehpunktabstand von 28 mm und einer Progressionslänge von 19 mm; letztere entspricht dem halben Durchmesser der Messglashalterungen.

**Tabelle 2: Übersicht der Blickfeldbreiten von Testglas 1 bis 4**

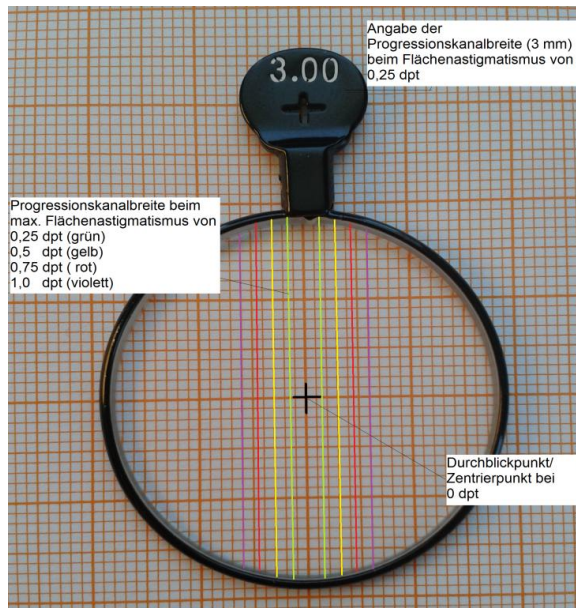
Test Glas	PZ Breite (mm) bei Amax (dpt)	Blickfeldbreite bei Beobachtungsabstand von 400 mm		PZ Breite (mm) bei Amax (dpt)	Blickfeldbreite bei Beobachtungsabstand von 400 mm		PZ Breite (mm) bei Amax (dpt)	Blickfeldbreite bei Beobachtungsabstand von 400 mm		PZ Breite (mm) bei Amax (dpt)	Blickfeldbreite bei Beobachtungsabstand von 400 mm	
	0,25	mm	Grad	0,5	mm	Grad	0,75	mm	Grad	1	mm	Grad
1	2	29,50	3,95	4	59,00	7,89	6	88,5	11,81	8	118,0	15,70
2	3	44,25	5,92	6	88,50	11,81	9	132,8	17,63	12	177,0	23,37
3	4	59,00	7,89	8	118,00	15,70	12	177,0	23,37	16	236,0	30,83
4	5	73,75	9,85	10	147,50	19,55	15	221,3	28,98	20	295,0	38,03



**Abbildung 4: Grafische Darstellung Flächenastigmatismus (links) und vertikaler Stärkenanstieg (rechts) Testglas Nr. 2**

Oberhalb des optischen Mittelpunkts von 0 dpt nehmen die dioptrischen Werte Richtung Fassungsrand hin negative Werte an; nach unten hin entsprechend der Addition des Gleitsichtglases nehmen sie positive Werte an. Abb. 4 zeigt eine grafische Darstellung des horizontal steigenden Flächenastigmatismus (linkes Bild) und den vertikalen Stärkenanstieg (rechtes Bild) des Testglases 2 mit 3 mm Progressionskanalbreite. Entlang der Hauptlinie befindet sich kein Flächenastigmatismus; bereits bei 3 mm peripher links und rechts der Hauptlinie (Progressionskanal= 6 mm) steigt der Flächenastigmatismus auf 0,5 dpt an. Die grafischen Darstellungen der horizontalen Flächenastigmatismen und der vertikalen Stärkenverteilung für die Testgläser Nr. 1, 3 und 4 befinden sich im Anhang ab S. XXV (Quelle Dr. Peter Baumbach).

Nachdem die ursprünglichen Refraktionsmessgläser aus der Halterung entfernt worden sind, werden die Testgläser zentrisch eingearbeitet, so dass der optische Mittelpunkt von 0 dpt dem geometrischen Mittelpunkt entspricht. Somit sind Unschärfemessungen im Glas bei Augenbewegungen nach links und rechts peripher vom optischen Mittelpunkt bis 19 mm möglich. Dies entspricht einem Blickwinkel von ca. 66°. Der Fassungsrand der Messbrille stellt dabei bei der Betrachtung eines 22" Flachbildschirms in 40 cm Entfernung keine Einschränkung für die Aufgabenstellung dar. Eine Ab- bzw. Adduktion der Augenbewegungsmuskeln ist bis maximal 50° möglich, das Gebrauchsblickfeld beträgt meist 20°, da vorher Kopfbewegungen einsetzen (Mühlendyck 1990). Die Messglasmarkierungen „+2“, „+3“, „+4“ und „+5“, welche normalerweise der dioptrischen Stärke der Refraktionsgläser entsprechen, repräsentierten nun bei den Gleitsichtgläsern 1 bis 4 die Progressionskanalbreite in Millimetern bei einem Flächenastigmatismus von 0,25 dpt (Abb.5). Es handelt sich um ein Kunststoffglas mit dem Brechungsindex  $n=1,5$  und einer Veredelungsschicht zur Entspiegelung für Reflexfreie klare Sicht. Die Gleitsichtgläser sind auf Basis der Berechnungen von Prof. Dr. P. Baumbach von der Firma *Schneider GmbH & Co.KG* (Gruppe: *Schneider Optical Machines Inc.*) angefertigt worden.



**Abbildung 5: Testglas Nr.2 in Metallschmalrandfassung**

#### **1.3.5.4 Unschärfekriterien**

Die zu beurteilenden wahrgenommenen Unschärfen beim peripheren Blick durch die Testgleitsichtgläser sind definiert wie die Kriterien in 1.3.4.2 mit folgendem Zusatz:

1. *gerade eben bemerkbare Unschärfe*: Position (der Markierungslinien) horizontal des Fixationspunktes, bei der die erste Veränderung in Klarheit und Schärfe der Buchstaben bemerkbar ist.
2. *gerade noch tolerierbare Unschärfe*: Position (der Markierungslinien) horizontal des Fixationspunktes, bei dem man die ersten (Lese-)Probleme durch den Mangel an Klarheit der Buchstaben bekommt, es aber dauerhaft tolerierbar ist.
3. *unakzeptable Unschärfe*: Position (der Markierungslinien), horizontal des Fixationspunktes, bei der das Niveau an Unschärfe erreicht ist, bei dem man dauerhaft ablehnen würde, lesen zu wollen.

Insgesamt wird der gesamte Bereich zwischen *bemerkbarer und unakzeptabler Unschärfe* als *Toleranzbereich* bezeichnet.

### 1.3.5.5 Ablauf der Messung

Nachdem die Probanden über Zweck und Ablauf der Studie informiert wurden, werden sie einer Einweisung zur Steuerung der Markierungslinien für den *Blurtest* unterzogen. Die Testperson ist in einer Kinnstütze fixiert für einen konstanten Beobachtungsabstand von 40 cm zwischen Auge und Bildschirm sowie zur Vermeidung von Kopfnäigungen während der Messungen (Abb. 6). Der Horthautscheitelabstand des Testglases wird bei jedem Proband gleich eingestellt auf 15 mm; die Vorneigung der Messbrille beträgt 12 Grad (Abb. 7).

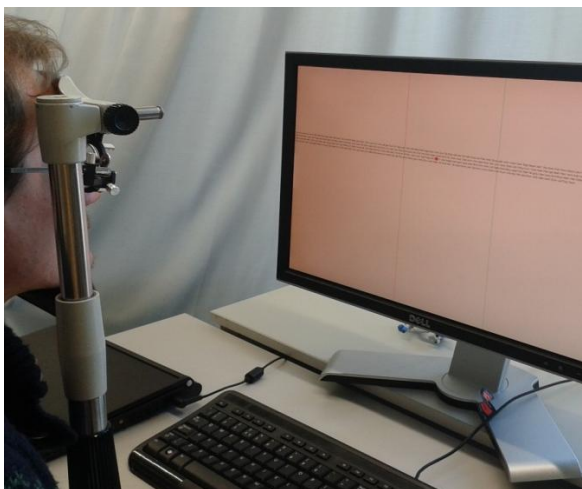


Abbildung 7: Messaufbau

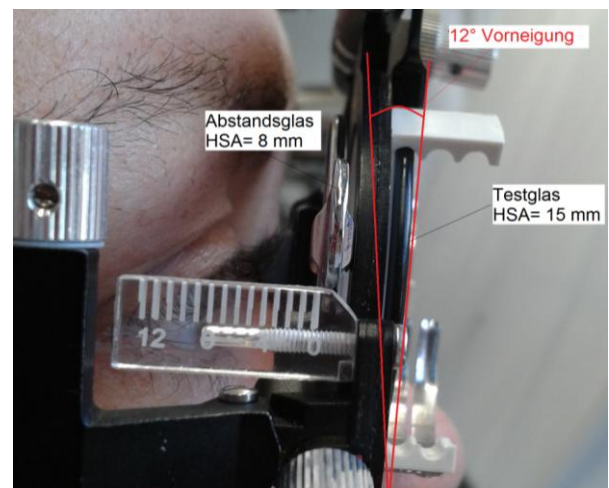


Abbildung 6: Messbrilleneinstellung

Vor jeder Messung galt es den Probanden so zu positionieren, dass er beim Blick geradeaus auf den Bildschirm den dargebotenen roten Fixationspunkt im Textblock durch den optischen Mittelpunkt von 0 dpt des jeweiligen Testglases betrachtet. Um das Blickfeld einzuschränken, wird als Fixierhilfe eine Lochblende vor das Testglas eingesetzt, die später vor der Messung wieder entfernt wird. Sollte der Fixationspunkt beim Blick durch die Lochblende also durch den optischen Mittelpunkt nicht zu fixieren sein, so ist der Textblock über eine Tastatur mit den Buchstaben *D* (down)



nach unten bzw. mit *U* (up) nach oben nachjustierbar. Um Pupillenpiel und einen Ausgleich der peripheren Unschärfe der Testgläser durch Akkommodation zu vermeiden, wird ein Abstandsglas von +2,5 dpt in den hinteren Teil der Messbrille eingesetzt (HSA= 8 mm); entsprechend dem Beobachtungsabstand von 40 cm. Die Eigenvergrößerung des Textes durch das Abstandsglas (+2,0 bis + 2,5 dpt je nach Refraktionswert) beträgt 1,6 bis 2,0 % und ist vernachlässigbar. Jede Testperson hatte eine Testphase vor den eigentlichen Messungen zu absolvieren, um Sitzposition und Steuerung der Marker zu optimieren, Fragen zu den Beurteilungskriterien zu stellen und um sich an das Beleuchtungsumfeld zu gewöhnen. Anschließend wird der Pupillenabstand und -durchmesser gemessen. Nachdem randomisiert eines der vier Testgleitsichtgläser vom Untersucher in die Messbrille eingesetzt und der Durchblickspunkt mit Hilfe der Lochblende optimiert wird, wird der Proband gebeten, die Markierungspunkte rechts und links so zu positionieren, dass die Lesbarkeit des Textes nach dem Kriterium 1 (gerade bemerkbare Unschärfe) erfüllt wird. Anschließend werden die Marker wieder an ihren Ausgangspunkt gesetzt, eine neue Textvorlage wird dargeboten und das Kriterium 2 (tolerierbare Unschärfe) soll eingestellt werden. Gleiches erfolgt mit dem 3. Kriterium (unakzeptable Unschärfe). Die Messungen für jedes Kriterium wird dreimal randomisiert wiederholt, um später einen Mittelwert bilden und eine Aussage über Wiederholbarkeit treffen zu können. Pro Proband werden 36 Messungen am *Blurtest* durchgeführt (*4 Testgläser x 3 Kriterien x 3 Wiederholungen*). Nach jedem Testglas wird der *Introspection Score* (siehe 1.3.2 Anamnesebogen, Frage 3) ermittelt, wobei der Proband den Unterschied in der Einstellung der Marker von Kriterium 1 und Kriterium 3 von 0 bis 5 bewerten sollte.

#### **1.3.5.6 Reproduzierbarkeit**

Mit zwei der fünf Probanden wird der *Blurtest* auf Reproduzierbarkeit unter gleichen Wiederholungsbedingungen geprüft. Reproduzierbarkeit oder Präzision einer Methode ist die Übereinstimmung von Messwerten innerhalb einer Messserie. Ziel ist eine möglichst hohe Wiederholgenauigkeit zu erlangen, d.h.,

dass die Messergebnisse wenig streuen. Es soll herausgefunden werden, ob eine Variation der Messergebnisse zu beobachten ist, wenn derselbe Untersucher mit der gleichen Messeinheit und gleichem Probanden wiederholt misst. Dabei werden wie beschrieben die Messungen für jedes Glas 1 bis 4 für die jeweiligen Beurteilungskriterien randomisiert durchgeführt und in einem Ablauf dreimal wiederholt. Es werden fünf Durchgänge wiederholt im Abstand von mindestens 4 bis maximal 18 Stunden. Folgende Hypothese soll überprüft werden  $H_0$ : *Die markierten Sehbereichsbreiten unterscheiden sich innerhalb eines Probanden nicht mehr als 2°.*

## 2 Stand der Forschung und Technik

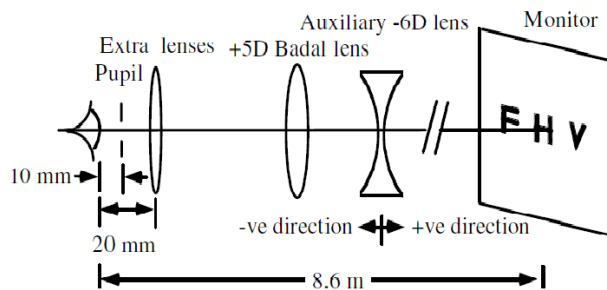
In den letzten Jahrzehnten haben sich einige Studien mit dem Thema „Unschärfegrenzen“ bzw. „Unschärfeadaptation“ für Defokus, Astigmatismus und Abbildungsfehler höherer Ordnung (Koma, Trifoil) auseinandergesetzt und unter verschiedenen Aspekten wie Wahl der Unschärfekriterien, Sehproben oder Visusgrößen befasst.

### 2.1 Zahlen und Fakten für dioptrisches Unschärfeempfinden

Objektiv lässt sich die Lage des Flächenastigmatismus bei Gläsern mit progressiv ansteigender Wirkung exzentrisch der Hauptlinie errechnen (Isoastigmatismuslinien), daraus wiederum lassen sich die Blickfeldbreiten ableiten (Minkwitz 1963, 2005). Wie hoch jedoch die individuelle Toleranz der Abbildungsfehler des Systems progressives Glas - Auge bei Sehaufgaben wie Lesen eines Textes oder Erkennung einzelner Buchstaben ist, kann nicht eindeutig festgelegt werden. Fest steht: Bei typischen Büroarbeiten (ca. 65 cm Arbeitsabstand) schränkt ein Gleitsichtglas durch die begrenzte Zone klaren Sehens das fließende Lese- und Arbeitsverhalten im Vergleich zu Einstärkengläsern ein (Selenow et al. 2002).

Atchison erhält bei Messungen zur Schärfentiefe, also zur Ausdehnung der gesamten Entfernungszone mit ausreichender Schärfe im Objektraum, Werte von  $0,86 \pm 0,28$  dpt,  $0,59 \pm 0,2$  dpt und  $0,55 \pm 0,2$  dpt für einen Pupillendurchmesser von 2 mm, 4 mm und 6 mm (4-fache Standardabweichung als Kriterium) (Atchison et al. 1997). Marcos berichtet von Werten für subjektive wahrnehmbare Unschärfe einer punktförmigen Quelle von 0,54 dpt, 0,31 dpt und 0,21 dpt ebenfalls für 2 mm, 4 mm und 6 mm Pupillendurchmesser (2-fache Standardabweichung als Kriterium) (Marcos et al. 1999). Es handelt sich also um vergleichbare Werte wie bei Atchison et al. mit 4-facher Standardabweichung.

2005 erweitert Atchison seine Untersuchungen, in dem er definierte Kriterien zur Unschärfebeurteilung bei Defokussierung an einem Badal Lens Optometer (Abb. 8) einführt (Atchison et al. 2005).



**Abbildung 8: Schema eines Badal Lens Optometer (Atchison 2005)**

So sind randomisiert 3 von 10 Buchstaben der Bailey-Lovie Chart in den Visusstufen 1,0; 0,5; 0,4; 0,25 und 0,2 dargeboten, wobei die Probanden zwischen „bemerkbarer“, „unangenehmer“ und „störender“ Unschärfe („noticeable, troublesome and objectionable limits of blur“) unterscheiden sollten. Die Ergebnisse der Grenze "bemerkbare" Unschärfe bei der Buchstabengröße von Visus 1,0 ergeben  $\pm 0,33$  dpt,  $\pm 0,30$  dpt und  $\pm 0,28$  dpt für eine Pupillengröße von 3 mm, 4 mm und 6 mm. Die Grenzen erweitern sich um 70 % bei Vergrößerung der Buchstaben auf Visus 0,2. Die Buchstabengröße hat einen signifikanten Einfluss auf alle Unschärfegrenzen (ca. 1,6- bis 2,1-fach). Alle Werte/Grenzen werden um 17 % reduziert, bei Vergrößerung des Pupillendurchmessers von 3 auf 6 mm. Die Grenzen für "unangenehme" und "störende" Unschärfe betragen das 1,6- 1,8- und 2,1-2,5- fache relativ zur "bemerkbaren" Unschärfe. Die Kriterien "unangenehm" und "störend" bleiben unbeeinflusst von der Buchstabengröße.

2009 wiederholen Atchison und seine Kollegen die Studie von 2005 und erweitern die Untersuchung der Grenzen von Unschärfeempfindungen auf Astigmatismus und Trifoil (Aberration höherer Ordnung) (Atchison et al. 2009).

Je nach Einstellung induzieren die Probanden selbst durch einen regelbaren Knopf Defokussierung und astigmatische Verzerrungen in acht verschiedenen Meridianen (Aberrationen niederer Ordnung) bei Buchstabengrößen mit dem Visus 0,8; 0,4 und 0,25. Bei zwei Probanden werden die Messungen der Unschärfegrenzen für Defokussierung und Astigmatismus durchgeführt, nachdem die eigenen inneren Aberrationen korrigiert werden. Zusätzlich werden die Unschärfegrenzen bei diesen zwei Probanden für Aberrationen 3. Ordnung (Trifoil) gemessen (Atchison et al. 2009, S.10). Allgemein treten die Unschärfegrenzen bei Astigmatismus (Meridian unabhängig) früher ein als bei Defokussierung der Buchstaben. Betrachtet man die Auswirkungen von den verschiedenen Meridianen des induzierten Astigmatismus werden signifikante Unterschiede festgestellt:

Am ehesten treten Unschärfewahrnehmungen beim 90° Meridian ein (Pluszylinderwirkung bei 90°); die Grenzspanne war geringer als für 67,5°, 22,5°, 157,5° und 0°. Die Begründung liegt in der horizontalen Verzerrung der Buchstaben; d.h. die Buchstaben verschwimmen ineinander. Bezüglich der meridionalen Abhängigkeit kann zusammengefasst werden, dass bei  $0^\circ \pm 22^\circ$  eine große Toleranzspanne im Unschärfeempfinden über alle Visusstufen und Empfindungskriterien vorliegt (Atchison et al. 2009, S. 16–17). Außerdem können Wechselwirkung zwischen den astigmatischen Meridianen mit anderen Abbildungsfehlern wie Koma oder Trifoil nachgewiesen werden.

Wie in früheren Studien ist ein Zusammenhang zwischen Visusstufe und Unschärfeempfinden nachweisbar: Werden die Buchstaben vergrößert von Visusstufe 0,8 auf 0,25, so werden die Unschärfegrenzen um das 2,3-fach erweitert (Atchison et al. 2009, S. 17–18). Dabei bleibt das Verhältnis von „störend“ zu „bemerkbar“ für Defokus, Astigmatismus und Trifoil gleich. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Buchstabengröße und den Unschärfekriterien, jedoch nicht zwischen Buchstabengröße und Astigmatismusmeridianen.

Die subjektiven Grenzen für Trifoil-Unschärfe sind höher als für Defokus und Astigmatismus, besonders wenn das Kriterium "störende Unschärfe"

verwendet wird. Die Begründung liegt darin, dass bei Erhöhung der Trifoil weniger die Schärfe der Buchstaben, sondern eher der Kontrast nachlässt (Atchison et al. 2009, S. 26). Weiterhin kann festgestellt werden, dass bei geschlossenen Buchstaben wie R und P das Unschärfeempfinden eher eintritt als bei offenen Buchstaben und bestimmte Buchstaben mehr von dem Einfluss der Meridianen betroffen sind als andere. Die Unschärfegrenzen für Defokussierung (5 mm Pupille) hat eine Spannweite von  $0,18 \pm 0,08$  dpt („bemerkt“ mit Visus 0,8) bis  $1,01 \pm 0,27$  dpt („störend“ mit Visus 0,25). Das astigmatische Unschärfeempfinden entspricht über alle Probanden, Kriterien und Pupillen-Durchmessern 90 % der Grenzen für Defokussierung, weshalb als Annäherung die Werte zur Toleranz für Unschärfe bei Defokus auch für Astigmatismus angenommen werden.

Ciuffreda verwendet ebenfalls drei Kriterien der Unschärfeempfindung: "erkennbare Unschärfe", "lästige oder unangenehme Unschärfe" und "nicht mehr auflösbare Unschärfe" – „detectable, bothersome and non-resolvable blur“ (Ciuffreda et al. 2006 S.897). Wobei sich das Kriterium „bothersome blur“ auf die kleinste Menge an zusätzlicher Defokussierungsunschärfe bezieht, welche die Wahrnehmung der Sehprobe unangenehm erschwert und vermutlich Aufgaben wie Lesen oder Erkennen von Objekten einschränken würde. Verwendet werden Snellen-Haken der Visusstufe 0,4 und 0,1 sowie drei Zeilen Text der Visusstufe 0,4 (Blickwinkel von 7° horizontal und 2° vertikal). Die Ergebnisse hinsichtlich der Kriterien sind vergleichbar mit denen von Atchison et al. 2005. Die Schwellenwerte für die „unangenehme Unschärfe“ bei Buchstabengrößen von Visus 0,4 sind bei E-Haken (1,02 dpt) und Text (1,34 dpt) signifikant nicht unterschiedlich. Auch bei dieser Studie liegen die Grenzen der unangenehmen Unschärfeempfindung bei großen Buchstaben (Visus 0,1) signifikant höher (1,8 dpt). Bei jeder Sehprobentafel ist der Durchschnittswert für die Schwelle zur "unangenehmen" Unschärfe signifikant höher als zur Schwelle "gerade entdeckter Unschärfe" und signifikant kleiner als zur Schwelle von "nicht mehr auflösbarer Unschärfe".

Eine andere Art die Akzeptanz von geringen Refraktionsfehlern bei verschiedenen Sehaufgaben zu bewerten, versuchen Miller et al. 1997. Es

werden acht verschiedene Testlinsen immer im Vergleich zum Referenzglas auf einer Skala von 0 bis 10 beurteilt: 0= Referenzglas ist komfortabler; 5= kein Unterschied im Komfort zum Referenzglas; 10= "Test"-Glas ist komfortabler (Miller, Anthony, D. et al. 1997, S. 522). Eine signifikante Anzahl an Probanden (vollkorrigierte Brillenträger) ist unzufrieden im Alltag mit einem unkorrigierten Refraktionsfehler von +0,25 dpt, sowohl in Sphäre als auch Zylinder in der Ferne. 14 der 20 Probanden sind unzufrieden mit einem Zylinder von +0,5 dpt Achse 180° (vertikale Verzerrung), wenn es zusätzlich zur Brillenkorrektur gegeben wird; die Unzufriedenheit steigt auf 95 %, wenn entweder ein Zylinder +0,5 Achse 90° (horizontale Verzerrung) oder +0,5 Achse 45° (schräge Verzerrung) gegeben wird (Miller, Anthony, D. et al. 1997, S. 522–523).

Auch das Leseverhalten bei dioptrischer Unschärfe lässt sich quantifizieren (Chung et al. 2007). Zur Bestimmung der Lesefähigkeit werden Sätze der MNREAD Acuity Chart in der Schriftgröße von Visus 0,8 bis 0,1 im Abstand von 40 cm (für +2 dpt und +3 dpt Defokus) und in der Schriftgröße von Visus 2,0 bis 0,25 im Abstand von 1 m (für 0 dpt, +0,5 dpt und +1 dpt Defokus) von Probanden laut vorgelesen. Die Lesegeschwindigkeit steigt mit der Schriftgröße bis zu einem bestimmten Wert, blieb dann konstant und entspricht der maximalen Lesegeschwindigkeit. Die maximale Lesegeschwindigkeit ist bis zu einer Unschärfe von +2 dpt nur gering beeinflusst; wird aber um 23 % langsamer bei +3 dpt. Erhöht man die Unschärfe von 0 dpt auf +3 dpt, so steigt die Schwelle zur erkennbaren Schriftgröße, d.h. die Schriftgröße korrespondiert zu 80 % mit der Lesegeschwindigkeit; die Lesesehschärfe und die Sehschärfe verschlechtert sich von Visus 1,25 auf Visus 0,3 bzw. Visus 1,6 auf 0,25 (Chung et al. 2007, S. 1590–1593).

Betrachtet man Studien, die sich direkt mit der Toleranz an Unschärfe in Gleitsichtgläsern befasst, erhält man andere Werte als für ein Einstärkenglas welches zusätzlichen Defokus und Astigmatismus ausgesetzt ist: Sullivan und Fowler haben 1989 die Sehschärfe eines Probanden exzentrisch der Hauptlinie drei verschiedener progressiver Glastypen (+2,0 dpt Nahaddition) gemessen und bewertet. Bei allen drei

Glastypen ist der Visus bis zu einer Exzentrizität  $< 10^\circ$ , was einem maximalen Astigmatismus von 1,5 dpt entspricht, besser als 1,0. Einen etwas geringen Toleranzwert hat Fisher 1997 mit dem Vergleich sechs verschiedener Glastypen mit sehr breiten bis sehr engen Nahbereich im Abstand von 40 cm und der Buchstabengröße von  $0,26^\circ$  (entspricht Visus 0,4) gemessen. Seine Ergebnisse zeigen, dass die Sehbereichsbreiten mit dem Linsendesign („eng“ bis „breit“) korrelieren und die Grenzen des "klaren und komfortablen" Sehens bei einem Astigmatismus von 0,95 dpt liegen; orientiert an den Isoastigmatismuslinien entspricht dies am ehesten der Isoastigmatismuslinie von 1,0 dpt (Fisher 1997, S.529) .

Villegas et al. können ebenfalls eine Sehleistung gleich oder besser als 1,0 nachweisen, so lang der Gesamtastigmatismus (gemessen Brillenglas in Kombination mit dem Auge) geringer als 0,9 dpt ( $0,46 \mu\text{m RMS}$ ) war. Dies entspricht den Werten ca.  $6^\circ$  exzentrisch der Hauptlinie (Villegas und Artal 2006). Diese Studie ergibt außerdem, dass im Progressionskanal die geringen Werte von Astigmatismus, Koma und Trifoil (total RMS ca.  $0,1 \mu\text{m}$ ) keinen signifikanten Einfluss auf die Sehschärfe haben unabhängig von der Buchstabengröße; d.h. die Sehqualität ist beim Blick durch den Progressionskanal gleich zum bloßen Auge. Im Progressionskanal setzen die okulären Abbildungsfehler die Bildqualität signifikant mehr herab als die Abbildungsfehler in dem Gleitsichtglas. Außerhalb des Kanals nimmt der Astigmatismus zu und dominiert die Abbildungsfehler, wobei die Werte für Koma und Trifoil gleich bleiben wie im Progressionskanal. Erst der progressive Anstieg von Astigmatismus hinzu äußeren Bereichen (ca. 0,75 dpt und 2,0 dpt für Bereiche 3 mm und 5,5 mm peripher vom Progressionskanal) verschlechtert zunehmend die Sehleistung. Andere Aberrationen höherer Ordnung sind vergleichsweise unbedeutend in den gemessenen Zonen (Villegas und Artal 2006, S.676-678).



## 2.2 Einflussfaktoren

Bei Studien mit Gleitsichtgläsern, dh. mit einer Zielgruppe von Personen fortgeschrittenen Alters, sollten immer altersbedingte Veränderungen des kornealen und okulären Systems berücksichtigt werden:

Ein Aspekt ist die Veränderung der Pupillenweite sowie der optischen Aberrationen mit dem Alter. So zeigen Winn et al. in einer Studie den linearen Zusammenhang zwischen der Abnahme des Pupillendurchmessers mit zunehmendem Alter unter verschiedenen Beleuchtungsstärken (Winn et al. 1994, S.1136).

Jahnke et al. erklären in einer Studie: "Mit zunehmendem Alter konnte eine Zunahme der optischen Abbildungsfehler und der Einfluss der Linse auf die okulären Aberrationen nachgewiesen werden." (Jahnke et al. 2006, S.599). Es erweisen sich ein altersbedingter Anstieg der okulären Koma-Aberration ( $C_3^{-1}$  und  $C_3^1$ ) um das 10-fache und ein 2-facher Anstieg der sphärischen okulären Aberration ( $C_4^0$ ) mit Verschiebung in positive Richtung sowie der Verlust der Korrelation kornealer und okulärer Aberrationen. Somit können Veränderungen individueller okulärer Einflussfaktoren mögliche Vorhersagen zu späteren Messungen einschränken.

Kline vergleicht in unterschiedlichen Altersgruppen die Fähigkeit, standardisierte Wortnachrichten (zwei bis vier Wörter) identifizieren zu können, nachdem die Sehschärfe durch Vorgabe von positiven dioptrischen Gläsern auf einen Visus von 0,7 und 0,5 herab gesetzt wurde. Die Schwelle der Buchstabengröße der älteren Versuchsgruppe liegt dabei signifikant unter der der jüngeren Versuchspersonen, d.h. die älteren Probanden sind eher in der Lage, optisch degradierten/ verschwommenen Text zu erkennen (Kline et al. 1999, S. 361). Eine mögliche Erklärung dafür sehen die Forscher in der Tatsache, dass die durchschnittliche Sehschärfe bei Tageslichtbedingungen und hohem Kontrast mit dem Alter abnimmt; so beträgt bei einem 20-Jährigen der Visus ca. 1,25 und fällt auf einen Visus von 0,7 mit 70 Jahren ab (Pitts 1982). Ältere Menschen haben somit höhere Erfahrungswerte mit unscharfen Objekten. Ähnliches berichten

Legge et al. in einer Studie über Low Vision Patienten; sie sprechen von einer *erhöhten Unschärferesistenz* im zunehmenden Alter und können nachweisen, dass die Fähigkeit, optische Unschärfe auszublenden, im umgekehrten Zusammenhang zum Visus steht (Legge et al. 1987, S. 858–861).

Anders als die Ergebnisse bei Kline et al. 1999, welche keine signifikanten Unterschiede der Altersgruppen feststellen konnte, brauchen in einer aktuelleren Studie von 2010 die ältere Probanden weniger sphärische Unschärfe, um die Sehleistung herab zu setzen von bestmöglich auf 0,7 und 0,5 (Jung und Kline 2010). Wird die Schärfe von Buchstaben optisch herab gesetzt auf einen Visus 0,5, sind ältere Probanden mit natürlicher Pupillengröße im Erkennen von Wörtern besser als jüngere. Die Fähigkeit bei älteren Menschen verschwommenen Text identifizieren zu können, scheint also durch beides beeinflusst zu sein: altersbedingte optische Veränderung und erfahrungsbedingte neuronale Kompensation. Für beide Altersgruppen ist das Maß an induzierter dioptrischer Unschärfe, um den Visus 0,7 und 0,5 zu erreichen, bei einer künstlichen 3 mm Pupille höher als bei der natürlichen Pupille, da mit kleiner werdenden Pupille die sphärischen Aberrationen reduziert werden (Jung und Kline 2010, S. 6–7). Altersbedingte Pupillenmiosis allein erklärt jedoch nicht die Fähigkeit, verschwommenen Text lesen zu können, da dieser Effekt nur bei Wörtern, nicht aber bei strichgezeichneten Bildern nachzuweisen ist (Jung und Kline 2010, S. 7).

Doch nicht nur altersbedingte physiologische Veränderung können die Messwerte beeinflussen, Woods et al. beschäftigen sich mit der Fragestellung, ob es einen Zusammenhang zwischen Unschärfetoleranz und individueller Persönlichkeitseigenschaften gibt. Ihre Werte für die individuelle Toleranzspanne liegen zwischen 0,0 dpt und 3,1 dpt (inkl. 2 Ausreißer) und sind vergleichbar mit Atchison et al. 2005 und Chiuffera 2006. Zudem können Woods et al. keine Korrelation zwischen Unschärfetoleranz und Fehlsichtigkeit feststellen; aber der gemessene Unschärfetoleranzbereich korreliert mit dem „introspection grade“ für den gefühlten Unterschied zwischen bemerkbar und störender Unschärfe (Woods et al. 2010, S.

6079). Die Probanden scheinen sich wohl der eigenen Toleranzspanne bewusst zu sein. Außerdem testet sie die Probanden mit sieben verschiedenen Fragebögen zur Persönlichkeit. Zwei der sieben Fragebögen korrelieren mit den Werten zur Unschärfetoleranz: beide beinhalten Fragen über Perfektionismus. "The "low self confidence" and "disorganisation" factors correlated positively with blur tolerance [...]" (Woods et al. 2010, S. 6077) Er schlussfolgert: Probanden mit geringem Selbstbewusstsein und unorganisiertem Lebensstil haben höhere Toleranzschwellen bei Unschärfe (S. 6081).

### 3 Ergebnisse und Auswertung

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie statistisch ausgewertet und Zusammenhänge dargestellt.

#### 3.1 Pretest und individuelle Toleranzbereitschaft bei unscharfen Texten

Beim Prüfen der Kriterien von *gerade bemerkbarer*, *tolerierbarer* und *unakzeptabler* Unschärfe von gedrucktem Text auf Papier modifiziert durch einen Weichzeichner – Filter, sind die Streubreite für Toleranz sehr groß ( $\sigma = 0,81$  dpt). *Bemerkbare* Veränderungen stellen die Probanden bei 0,25 px bis 0,75 px Radiusvergrößerung fest (im Mittel  $0,4 \pm 0,22$  px); *tolerierbar* zum Lesen ist es von 0,5 px bis 2,25 px (im Mittel  $1,45 \pm 0,81$  px) festgelegt und *unakzeptabel* bzw. nur noch mit Vermutung und Mühe erkennbar, ist der Text bei einer Modifikation von 0,75 px bis 10 px Weichzeichnerradius (im Mittel  $1,8 \pm 0,77$  px). Die Mittelwerte für das jeweilige Kriterium unterscheiden sich signifikant voneinander. Eine Übersicht der Verteilung ist in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Ergebnisse Pretest**

Proband	Pretest: Pixelradius		
	bemerkbar	tolerierbar	unakzeptabel
1	0,5	0,75	1,25
2	0,75	2,25	2,5
3	0,25	1,5	2
4	0,25	0,5	0,75
5	0,25	2,25	2,5
Mittelwert	0,4	1,45	1,8
$\sigma$	0,224	0,818	0,779

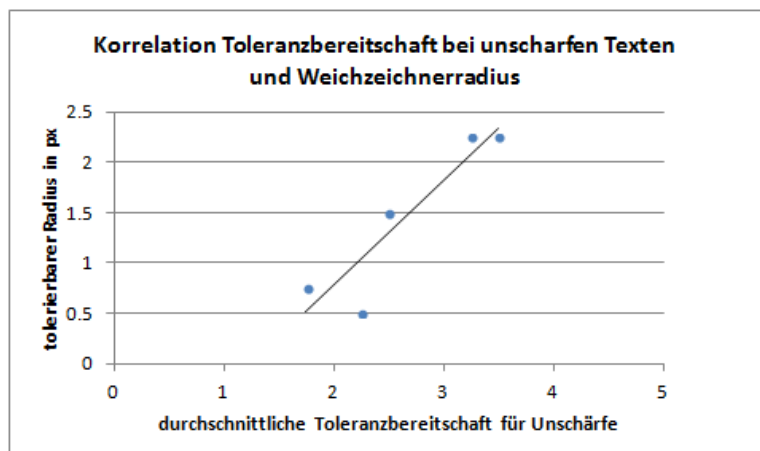
Bei der Frage, wie hoch bei den Probanden die Toleranzspanne in Bezug auf die Bereitschaft ist, unscharfe bzw. verschwommene Texte in verschiedenen Alltagssituationen lesen zu können, ergab sich folgendes Ergebnis: allgemein ist die Bereitschaft, unscharfe Texte bei Büchern und am PC zu

tolerieren geringer (im Mittel 2 bzw. 2,4 Punkte) als bei Anzeigetafeln im Bus oder am Flughafen und im Fernsehen/ Teletext (im Mittel 3,2 bzw. 3 Punkte). Die Verteilung der durchschnittlichen Toleranzbereitschaft unter den Probanden war 1,75 bis 3,5 von 5 Punkten (Tabelle 4). Proband 1 und 4 hatten mit 1,75 und 2,25 Punkten die geringsten Werte, gleiches gilt für die Ergebnisse im *Pretest* für das Kriterium *tolerierbare* Unschärfe.

**Tabelle 4: Bewertung der Toleranzbereitschaft auf einer Skala von 0-5**

Proband	Toleranzbereitschaft bei unscharfen Texten			
	Buch	PC	Anzeigetafel	TV
1	2	3	1	1
2	2	4	4	3
3	2	1	4	3
4	1	1	3	4
5	3	3	4	4
Mittelwert	2	2,4	3,2	3

Es kann bei den Probanden eine hohe Korrelation ( $r_{\text{Pearson}} = 0,91$ ) zwischen der Toleranzbereitschaft, unscharfe Texte in Alltagssituationen zu lesen und der Beurteilung von gedrucktem modifiziertem Text mit Weichzeichner Filter im Beurteilungskriterium *tolerierbar Unschärfe* festgestellt werden (Abb. 9).



**Abbildung 9: Zusammenhang Pretest und Toleranz für Unschärfe im Alltag**

### 3.2 Blurtest

Die Werte für *eben bemerkbare Unschärfe* liegen im Mittel bei den Testgläsern 1 bis 4 bei einem Astigmatismus in Gebrauchsstellung von  $0,65 \pm 0,27$  dpt mit einer Streubreite von 1 dpt ( $0,27 - 1,27$  dpt) über alle Probanden mit einer durchschnittlichen Pupillenweite von 3,5 mm (inkl. einem Ausreißer). Die Mittelwerte und Streubreiten der Werte für Blickfeldbreite und in diesem Zusammenhang ansteigenden Astigmatismus zur Peripherie des Glases hin nehmen mit den zu beurteilenden Kriterien für *tolerierbare* und *unakzeptable* Unschärfeempfinden zu: *tolerierbare Unschärfe* liegen im Mittel bei einem Astigmatismus von  $1,16 \pm 0,36$  dpt ( $0,3 - 1,9$  dpt) und *unakzeptable Unschärfe* bei  $1,64 \pm 0,48$  dpt ( $0,48 - 2,61$  dpt). Die Differenz des minimalen und maximalen Wertes des maximalen Astigmatismus steigt mit den Kriterien an; dh. die mittlere Differenz zwischen minimalen und maximalem Wert für *bemerkbare* Unschärfe beträgt  $0,62 \pm 0,18$  dpt, für *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe* beträgt die mittlere Differenz der Werte  $0,98 \pm 0,2$  dpt bzw.  $1,29 \pm 0,29$  dpt. Die Verteilungen aller Werte über die Gläser und Probanden sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Mediane stimmen bei jedem Kriterium mit einer Abweichung  $< 0,08$  dpt mit den Mittelwerten nahezu überein. 50 % der Daten liegen zwischen 0,47 bis 0,76 dpt, 0,91 bis 1,4 dpt bzw. 1,37 bis 1,84 dpt für *bemerkbare*, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe*.

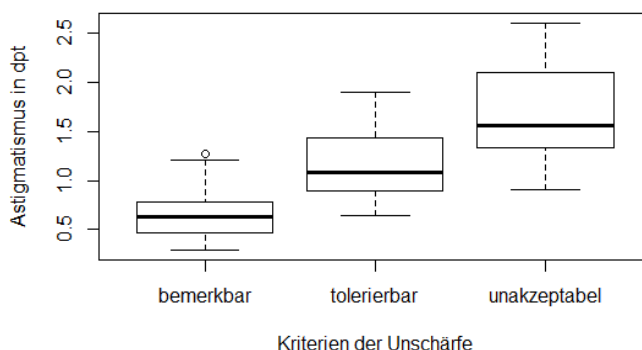
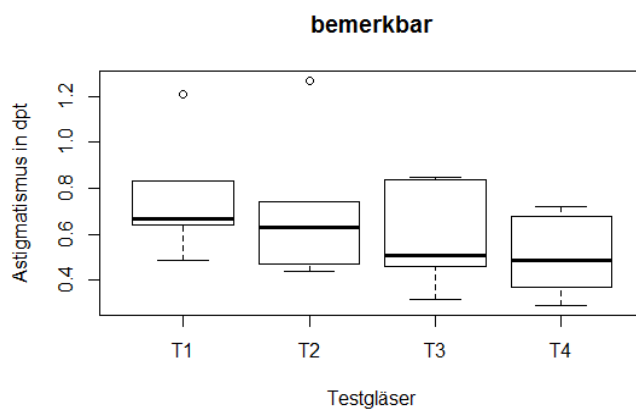
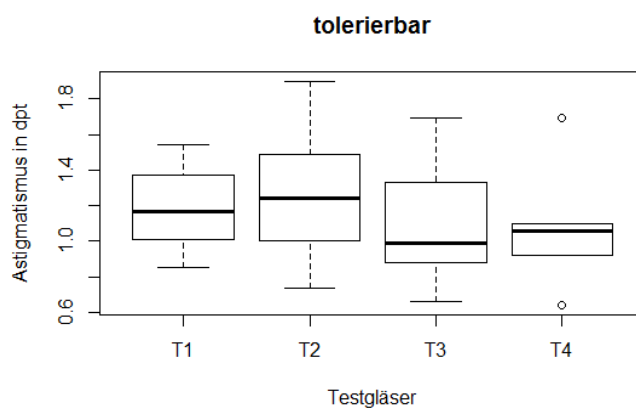


Abbildung 10: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden

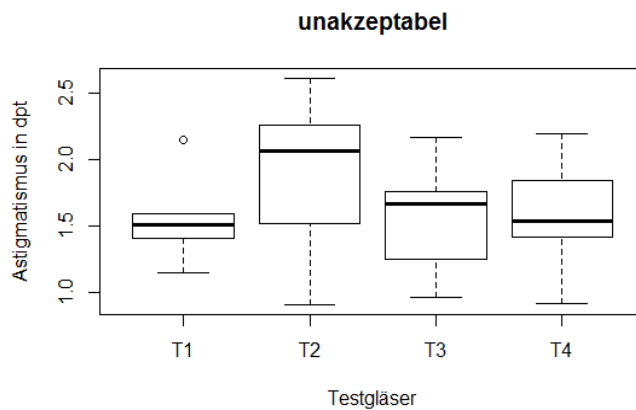
Betrachtet man die Werte für *bemerkbare Unschärfe* über alle Gläser, kann man feststellen, dass der Median des Astigmatismus in Gebrauchsstellung mit breiter werdendem Progressionskanal sinkt von 0,67 dpt (Testglas 1) auf 0,49 dpt (Testglas 4). Bei *tolerierbarer Unschärfe* ist ebenfalls eine Tendenz der Verschiebung der zu niedrigeren astigmatischen Werten zu erkennen. Bei den Werten für *unakzeptable Unschärfe* ist kein Muster zu erkennen. Bis auf Testglas 1 sind die Streuwerte bei allen Gläsern sehr hoch und die Mediane nicht vergleichbar (Abb. 11 bis 13).



**Abbildung 11: bemerkbare Unschärfegrenzen je Testglas für aller Probanden**



**Abbildung 12: tolerierbare Unschärfegrenzen je Testglas aller Probanden**



**Abbildung 13: unakzeptable Unschärfegrenzen je Testglas aller Probanden**

Übertragen auf die Blickwinkel, die bei den Testgläsern mit ansteigender Progressionskanalbreite von 2 mm auf 5 mm möglich sind, bedeutet folgende Blickfeldbreiten in einem Beobachtungsabstand von 40 cm:

Bei Glas 1 mit einem Progressionskanal von 2 mm (entspricht einem Gleitsichtglas mit einer Addition zwischen 2,25 und 2,5 dpt) beträgt die Blickfeldbreite in der dauerhaftes Lesen und Arbeiten noch *tolerierbar* wäre zwischen 9,95 cm und 18,16 cm. Die Differenzen zwischen minimalen und maximalen Einstellpunkten für das jeweilige Kriterium schwanken dabei zwischen 8,5 cm bis 11,8 cm. *Bemerkbare* Veränderungen setzen zwischen 5,7 cm und 14,3 cm ein; *unakzeptable* Unschärfe ist ab 13,4 cm bzw. 25,3 cm Blickfeldbreite festzustellen. Zum Vergleich: bei einem 22" TFT-Flachbildschirm beträgt die Breite einer Layoutseite eines Word Dokuments 22,5 cm. Mit breiter werdendem Progressionskanal nimmt die Blickfeldbreite zu. So beträgt die *tolerierbare* Blickfeldbreite zum Lesen beim Glas 2 mit 3 mm Progressionskanalbreite (entspricht einer Addition von 1,5 bis 1,75 dpt) zwischen 13 cm und 33,6 cm; beim Glas 3 und 4 mit 4 bzw. 5 mm Progressionsbreite (entspricht ungefähr einer Addition von 1,25 bzw. 1,0 dpt) betragen die *tolerierbaren* Blickfeldbreiten zwischen 15,4 bis 39,8 cm bzw. 18,9 bis 49,8 cm. In 58,3 % der Fälle stellen Proband 1 und 4 den maximal bzw. minimal gemessenen Wert aller Markierungseinstellungen in der gesamten Gruppe dar.



Die jeweiligen grafischen Auswertungen zu den Unschärfegrenzen des Astigmatismus in Gebrauchsstellung bei Glas 1 bis 4 sind in Abbildungen. 52-55 im Anhang ab Seite XXVI dargestellt.

Mit dem Shapiro-Wilk-Test wird auf Normalverteilung der Werte geprüft, da der Test insbesondere bei der Überprüfung von kleineren Stichproben mit  $n < 50$ , wie in dieser Studie, eine hohe Teststärke aufweist. Die Nullhypothese  $H_0$  nimmt an, dass eine Normalverteilung der Grundgesamtheit vorliegt. Die Nullhypothese wird nicht abgelehnt, wenn der p-Wert größer ist als das festgelegte Signifikanzniveau von 5 %, d.h. ist der geprüfte p-Wert  $> 0,05$  so liegt Normalverteilung vor. Tabelle 5 zeigt, dass für alle Probanden in jedem Kriterium und Testglas die Werte normalverteilt sind.

**Tabelle 5: p-Werte Shapiro-Wilk-Test für alle Probanden**

Proband	bemerkbar	tolerierbar	unakzeptabel
1	0,125	0,495	0,873
2	0,188	0,532	0,986
3	0,963	0,677	0,121
4	0,817	0,301	0,188
5	0,182	0,490	0,607

Mit Hilfe der *Anova* wird eine einfaktorielle Varianzanalyse für die Messwerte innerhalb und unter den Probanden durchgeführt. Geprüft wurde auf dem Signifikanzniveau von 5 % ( $p < 0,05$ ). Somit kann ermittelt werden, ob sich innerhalb eines Probanden die Astigmatismen in Gebrauchsstellung bzw. deren Mittelwerte bei Glas 1 bis 4 in denen das jeweilige Kriterium für Unschärfe einsetzt, signifikant unterscheiden. Zu erwähnen ist, dass aufgrund der geringen Zahl an Messwerten eine statistische Aussage nur bedingt allgemeine Gültigkeit besitzt.

Tabellen 6 bis 8 zeigen die Ergebnisse für folgende Nullhypothese  $H_0$ : *Es gibt keinen Unterschied der Grenzwerte für Unschärfe (Astigmatismen in Gebrauchsstellung) innerhalb eines Probanden für das jeweilige Kriterium.*

Tabelle 6: Varianzprüfung Astigmatismus für bemerkbare Unschärfe

bemerkbare Unschärfe						
Proband	Testglas	Mittelwert	$\sigma$	Prüfgröße F	krit. F-Wert	H0: Werte sind
		dpt	dpt			
1	1	1,21	0,04	38,86	4,07	signifikant verschieden
	2	1,27	0,13			
	3	0,85	0,07			
	4	0,72	0,03			
2	1	0,83	0,04	1,75	4,07	nicht signifikant verschieden
	2	0,74	0,10			
	3	0,84	0,17			
	4	0,68	0,03			
3	1	0,64	0,04	1,11	4,07	nicht signifikant verschieden
	2	0,63	0,09			
	3	0,46	0,11			
	4	0,49	0,05			
4	1	0,49	0,02	9,35	4,07	signifikant verschieden
	2	0,47	0,07			
	3	0,32	0,04			
	4	0,29	0,08			
5	1	0,67	0,11	8,52	4,07	signifikant verschieden
	2	0,44	0,08			
	3	0,51	0,07			
	4	0,37	0,01			

Tabelle 7: Varianzprüfung Astigmatismus für tolerierbare Unschärfe

tolerierbare Unschärfe						
Proband	Testglas	Mittelwert	$\sigma$	Prüfgröße F	krit. F-Wert	H0: Werte sind
		dpt	dpt			
1	1	1,54	0,10	20,26	4,07	signifikant verschieden
	2	1,90	0,04			
	3	1,33	0,07			
	4	1,11	0,22			
2	1	1,37	0,12	2,10	4,07	nicht signifikant verschieden
	2	1,50	0,29			
	3	1,70	0,18			
	4	1,69	0,14			
3	1	1,02	0,16	3,16	4,07	nicht signifikant verschieden
	2	1,24	0,08			
	3	0,99	0,11			
	4	1,07	0,07			
4	1	0,85	0,12	3,99	4,07	nicht signifikant verschieden
	2	0,74	0,01			
	3	0,66	0,09			
	4	0,64	0,06			
5	1	1,17	0,02	7,03	4,07	signifikant verschieden
	2	1,00	0,06			
	3	0,88	0,06			
	4	0,93	0,14			

**Tabelle 8: Varianzprüfung Astigmatismus für unakzeptable Unschärfe**

unakzeptable Unschärfe						
Proband	Testglas	Mittelwert	$\sigma$	Prüfgröße F	krit. F-Wert	H0: Werte sind
		dpt	dpt			
1	1	2,15	0,17	15,92	4,07	signifikant verschieden
	2	2,62	0,26			
	3	1,77	0,12			
	4	1,55	0,23			
2	1	1,59	0,21	2,86	4,07	signifikant verschieden
	2	2,07	0,31			
	3	2,20	0,44			
	4	2,19	0,09			
3	1	1,41	0,04	4,40	4,07	signifikant verschieden
	2	2,27	0,34			
	3	1,71	0,44			
	4	1,85	0,21			
4	1	1,15	0,06	7,34	4,07	signifikant verschieden
	2	0,91	0,04			
	3	0,97	0,10			
	4	0,92	0,06			
5	1	1,51	0,03	1,72	4,07	nicht signifikant verschieden
	2	1,53	0,30			
	3	1,25	0,14			
	4	1,42	0,06			

6 von 15 Prüfungen (40%) ergeben signifikant nicht verschiedene Messergebnisse innerhalb eines Probanden. Proband 1 ist die einzige Person, bei der alle Werte signifikant verschieden sind und die Prüfgröße F im zweistelligen Bereich stark von den anderen abweicht, d.h. hohe Schwankungen vorliegen. Bei drei von fünf Probanden sind die Messergebnisse für *tolerierbare Unschärfe* signifikant nicht verschieden. Nur bei Proband 5 sind die Mittelwerte für *unakzeptable Unschärfe* signifikant nicht verschieden.

Zusätzlich wird eine Varianzanalyse für die Blickwinkel der Probanden untereinander für die einzelnen Testgläser durchgeführt; damit im Zusammenhang stehend auch für die Blickfeldbreite und maximalen Astigmatismus in Gebrauchsstellung. Tabellen 9 bis 11 zeigen die Ergebnisse für folgende Nullhypothese  $H_0$ : *Es gibt kein Unterschied der Blickwinkel (Blickfeldbreiten) eines Testglases im jeweiligen Beurteilungskriterium zwischen den Probanden.*

**Tabelle 9: Varianzprüfung max. Blickwinkel je Testglas für bemerkbare Unschärfe**

bemerkbare Unschärfe						
Blickwinkel		Mittelwert	$\sigma$	Prüfgröße F	Kritischer F-Wert	Ho: Werte sind
Testglas	Proband	Grad	dpt			
1	1	18,47	0,50	66,14	3,48	signifikant verschieden
	2	12,90	0,53			
	3	10,03	0,58			
	4	7,63	0,31			
	5	10,43	1,70			
2	1	27,77	2,35	37,74	3,48	signifikant verschieden
	2	17,10	2,17			
	3	14,67	1,95			
	4	10,97	1,55			
	5	10,23	1,86			
3	1	25,17	1,81	18,17	3,48	signifikant verschieden
	2	24,80	4,42			
	3	14,20	3,21			
	4	9,83	1,14			
	5	15,63	1,89			
4	1	26,37	0,81	43,06	3,48	signifikant verschieden
	2	25,20	0,95			
	3	18,57	1,83			
	4	11,23	3,19			
	5	14,37	0,31			

**Tabelle 10: Varianzprüfung max. Blickwinkel je Testglas für tolerierbare Unschärfe**

tolerierbare Unschärfe						
Blickwinkel		Mittelwert	$\sigma$	Prüfgröße F	Kritischer F-Wert	Ho: Werte sind
Testglas	Proband	Grad	dpt			
1	1	23,00	1,39	17,59	3,48	signifikant verschieden
	2	20,67	1,60			
	3	15,60	2,33			
	4	13,10	1,78			
	5	17,80	0,35			
2	1	38,20	0,61	36,84	3,48	signifikant verschieden
	2	31,63	4,80			
	3	27,23	1,46			
	4	16,97	0,25			
	5	22,60	1,23			
3	1	36,17	1,40	46,57	3,48	signifikant verschieden
	2	42,93	2,92			
	3	28,60	2,65			
	4	19,90	2,43			
	5	25,83	1,65			
4	1	37,07	5,39	22,69	3,48	signifikant verschieden
	2	49,37	2,23			
	3	36,27	1,78			
	4	23,93	2,08			
	5	32,43	3,79			

**Tabelle 11: Varianzprüfung max. Blickwinkel je Testglas für unakzeptable Unschärfe**

unakzeptable Unschärfe						
Blickwinkel		Mittelwert	$\sigma$	Prüfgröße F	Kritischer F-Wert	Ho: Werte sind
Testglas	Proband	Grad	dpt			
1	1	30,63	2,06	26,04	3,48	signifikant verschieden
	2	23,63	2,79			
	3	21,20	0,53			
	4	17,50	0,87			
	5	22,57	0,46			
2	1	47,30	2,77	23,99	3,48	signifikant verschieden
	2	40,43	4,39			
	3	43,10	4,09			
	4	20,70	0,85			
	5	32,13	5,00			
3	1	44,13	2,01	11,64	3,48	signifikant verschieden
	2	49,97	5,35			
	3	42,63	6,93			
	4	28,00	2,59			
	5	34,50	2,91			
4	1	46,63	4,47	36,18	3,48	signifikant verschieden
	2	56,43	1,05			
	3	51,77	3,04			
	4	32,30	1,66			
	5	44,50	1,15			

Die Messergebnisse für jedes Testglas und Kriterium waren für alle Probanden signifikant verschieden. Die Mittelwerte der einzelnen Probanden für die Blickwinkel bei *bemerkbarer*, *tolerierbarer* und *unakzeptabler Unschärfe* unterscheiden sich zur Gruppe.

### 3.3 Selbstbewertung Toleranzbreiten (Introspection)

Nach jedem gemessenem Testglas soll der Proband eine Selbsteinschätzung auf einer Skala von 0 bis 5 (Introspection grade) abgeben, wie groß der Unterschied zwischen den Markierungseinstellungen 1 *bemerkbare Unschärfe* und 3 *unakzeptabler Unschärfe*, ist. Im Mittel werden für das Glas 1 2 Punkte, für Glas 2 3 Punkte und für Glas 3 und 4 3,4 bzw. 4,2 Punkte vergeben. Die Differenz zwischen *bemerkbar* und *unakzeptabel* ist der gesamte Unschärfetoleranzbereich. Der Unterscheid zwischen einem kleinen Steigungsgradienten (Testglas 4) und großen Steigungsgradienten (Testglas 1) im Flächenastigmatismus zur Peripherie des Glases hin, kann

im gefühlten und gemessenen Abstand der Markierungseinstellungen zwischen *bemerkbar* und *unakzeptabel* bestätigt werden. Der Korrelationskoeffizient beträgt  $r_{\text{Pearson}} = 0,59$  und impliziert einen mittelstarken Zusammenhang und ist mit der Literatur (Woods et al. 2010, S. 6079) vergleichbar. Abbildung 14 zeigt die Verteilung der Bewertungspunkte 0 bis 5 (Introspection grade) bei allen Testgläsern.

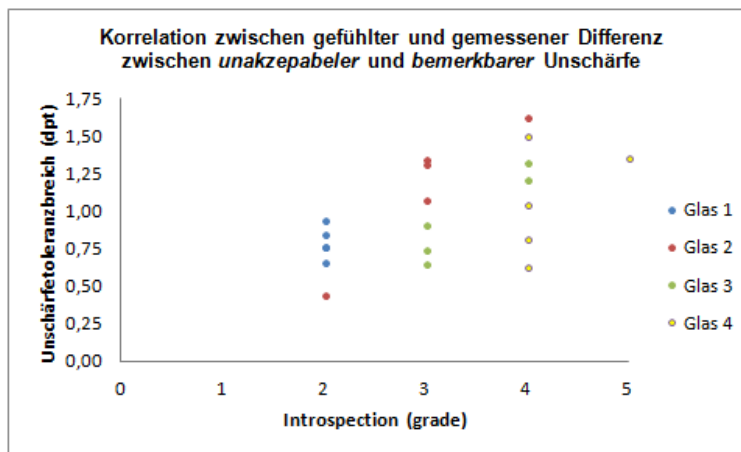


Abbildung 14: Korrelation Introspection grade und Toleranzbereichsbreite

### 3.4 Reproduzierbarkeit

Nachdem die erste Auswertung der Gruppe erfolgt, wird mit Proband 1 und 4, welche bei den ersten Messungen in den meisten Fällen die maximalen und minimalen Extremwerte widerspiegeln, auf Reproduzierbarkeit unter Wiederholungsbedingungen geprüft. Durch eine einfaktorielle Varianzanalyse wird bei den normalverteilten Daten getestet, ob sich die Werte des Blickwinkels bei jeder Wiederholung signifikant unterscheiden oder nicht. Die zu prüfende Nullhypothese lautet  $H_0$ : *Es gibt keinen Unterschied der Grenzen für Unschärfe (Astigmatismen in Gebrauchsstellung) eines Testglases im jeweiligen Beurteilungskriterium zwischen den Wiederholungsmessungen.* Eine Reproduzierbarkeit für den *Blurtest* ist gegeben, wenn die Nullhypothese erfüllt ist und sich die Blickwinkel nicht mehr als  $2^\circ$  je Wiederholungsmessung unterscheiden.

### 3.4.1 Proband 1

Abbildung 15 zeigt die Verteilung der Unschärfegrenzen nach fünf zeitlich verschiedenen Wiederholungen. Die Mediane stimmen mit einer Abweichung von  $< 0,07$  dpt mit den Mittelwerten bei jedem Kriterium überein. Die Grenzen für *bemerkbare*, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe* setzten im Mittel bei  $1,04 \pm 0,14$  dpt,  $1,54 \pm 0,29$  dpt bzw.  $2,12 \pm 0,41$  dpt ein. Ein Anstieg der Streubreiten mit den Kriterien ist auch hier festzustellen.

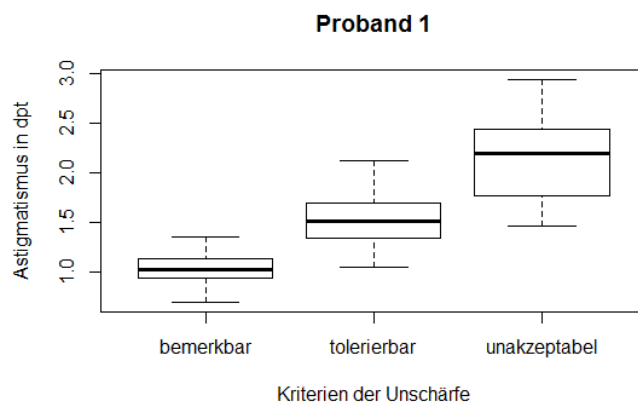


Abbildung 15: Unschärfegrenzen je Kriterium Proband 1

Tabelle 12 zeigt die p-Werte des Shapiro-Wilk-Tests mit Prüfung auf Normalverteilung. Die hervorgehobenen Werte bei *tolerierbarer Unschärfe* (Testglas 1 und 4) besitzen einen  $p\text{-Wert} < 0,05$  und sind somit nicht normalverteilt. Alle anderen Werte sind normalverteilt und werden mit Hilfe der ANOVA auf die Nullhypothese geprüft.

Tabelle 12: p-Werte Shapiro-Wilk-Test Proband 1

Testglas	bemerkbar	tolerierbar	unakzeptabel
1	0,535	<b>0,042</b>	0,073
2	0,083	0,197	0,628
3	0,493	0,059	0,226
4	0,704	<b>0,005</b>	0,120

Tabellen 11 bis 13 zeigen die Ergebnisse der Blickwinkel und maximalen Astigmatismen in Gebrauchsstellung von Testglas 1 bis 4 für das jeweilige Kriterium für Proband 1: Testglas 3 hat bei jedem Kriterium die geringsten Abweichungen zum kritischen F-Wert. Bei bemerkbarer Unschärfe entspricht die Prüfgröße F dem kritischen F-Wert.

**Tabelle 13: Varianzprüfung bemerkbare Unschärfe Proband1**

	bemerkbare Unschärfe					
	Mittelwert		$\sigma$	Prüfgröße F	kritischer F-Wert	H0: Werte sind
Testglas	Blickwinkel (°)	$\Delta A_{\max}$ (dpt)	$\Delta A_{\max}$ (dpt)			
1	16,90	1,10	0,07	4,428	3,478	signifikant verschieden
	16,47	1,07	0,05			
	18,13	1,19	0,10			
	17,37	1,14	0,13			
	20,50	1,36	0,10			
2	21,20	0,94	0,04	12,740	3,478	signifikant verschieden
	19,80	0,87	0,01			
	23,37	1,04	0,11			
	26,80	1,22	0,04			
	25,53	1,15	0,10			
3	26,23	0,90	0,09	3,478	3,478	signifikant verschieden
	29,37	1,02	0,11			
	27,87	0,96	0,10			
	32,73	1,17	0,10			
	26,00	0,89	0,04			
4	35,17	1,03	0,14	5,778	3,478	signifikant verschieden
	36,27	1,07	0,10			
	25,87	0,70	0,08			
	33,00	0,94	0,04			
	33,43	0,96	0,11			



Tabelle 14: Varianzprüfung tolerierbare Unschärfe Proband 1

	tolerierbare Unschärfe					
	Mittelwert		$\sigma$	Prüfgröße F	kritischer F-Wert	H0: Werte sind
Testglas	Blickwinkel (°)	$\Delta A_{\max}$ (dpt)	$\Delta A_{\max}$ (dpt)			
1	20,43	1,35	0,05	-	-	Nicht normalverteilt
	19,53	1,29	0,02			
	22,30	1,49	0,05			
	25,33	1,72	0,05			
	29,43	2,05	0,22			
2	25,60	1,16	0,15	22,536	3,478	signifikant verschieden
	26,73	1,22	0,03			
	31,47	1,48	0,08			
	36,77	1,81	0,17			
	41,27	2,12	0,22			
3	36,17	1,34	0,20	21,189	3,478	signifikant verschieden
	37,83	1,41	0,12			
	36,57	1,35	0,02			
	48,23	2,04	0,05			
	41,00	1,58	0,06			
4	46,87	1,55	0,06	-	-	Nicht normalverteilt
	47,67	1,59	0,04			
	35,87	1,05	0,13			
	46,77	1,54	0,06			
	49,23	1,69	0,12			

Tabelle 15: Varianzprüfung unakzeptable Unschärfe Proband 1

	unakzeptable Unschärfe					
	Mittelwert		$\sigma$	Prüfgröße F	kritischer F-Wert	H0: Werte sind
Testglas	Blickwinkel (°)	$\Delta A_{\max}$ (dpt)	$\Delta A_{\max}$ (dpt)			
1	24,20	1,63	0,02	14,613	3,478	signifikant verschieden
	23,33	1,57	0,10			
	26,93	1,85	0,07			
	33,73	2,44	0,41			
	34,87	2,54	0,18			
2	31,43	1,48	0,08	13,551	3,478	signifikant verschieden
	35,17	1,70	0,09			
	42,03	2,18	0,16			
	47,17	2,61	0,15			
	46,47	2,57	0,47			
3	50,60	2,26	0,50	7,869	3,478	signifikant verschieden
	47,90	2,02	0,25			
	45,53	1,85	0,05			
	58,30	2,95	0,14			
	53,37	2,45	0,10			
4	59,20	2,44	0,17	30,345	3,478	signifikant verschieden
	56,60	2,20	0,06			
	45,60	1,49	0,14			
	54,23	2,01	0,04			
	57,47	2,28	0,12			

Alle wiederholten Messwerte für den Astigmatismus in Gebrauchsstellung sind signifikant verschieden. Die Sehbereichsbreiten unterscheiden sich bei jeder Wiederholung um mehr als  $2^\circ$ . Mit zunehmendem Beurteilungskriterium *bemerkbar* bis *unakzeptabel* nimmt die Differenz der Prüfgröße *F* zum kritischen *F*-Wert zu. Die Messergebnisse sind für Proband 1 beim *Blurtest* nicht reproduzierbar. Sie Schwankungen lassen sich auch im Wiederholungsprofil erkennen (Abb. 11): Besonders beim Kriterium für *unakzeptable Unschärfe* sind die Schwankungen stark; es lässt sich kein konstanter Testverlauf bei den fünf Wiederholungen im Muster erkennen.

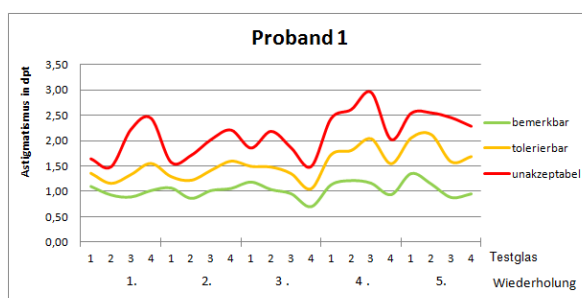


Abbildung 16: Wiederholungsprofil Proband 1

Legt man den Testphasenverlauf aller Wiederholungen übereinander, sind die Schwankungen je Wiederholung deutlich zu erkennen.

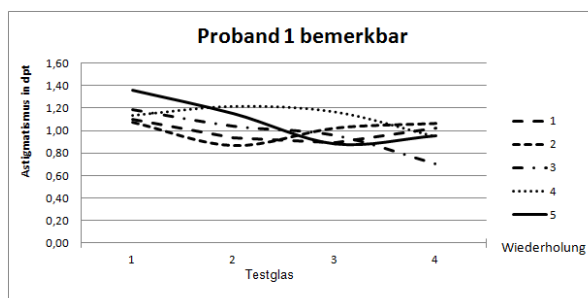
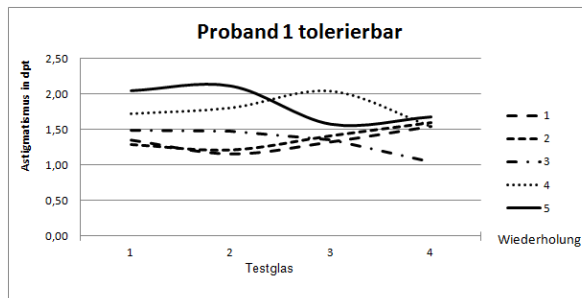
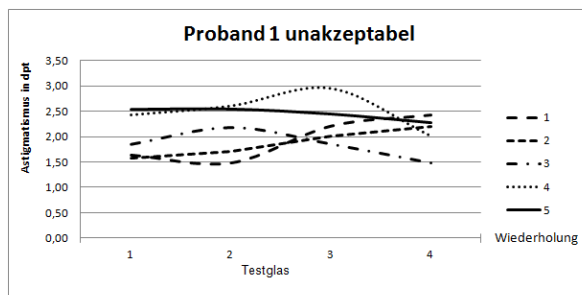


Abbildung 17: Phasenverlauf der Wiederholung bei bemerkbarer Unschärfe



**Abbildung 18: Phasenverlauf je Wiederholung bei tolerierbarer Unschärfe**



**Abbildung 19: Phasenverlauf je Wiederholung bei unakzeptabler Unschärfe**

### 3.4.2 Proband 4

Proband 4 hat bei allen Messungen den untersten Extremwert im Vergleich zur Gruppe, d.h. die niedrigsten Werte beim Astigmatismus in Gebrauchsstellung für *bemerkbare*, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe*. Außerdem dauern die Messungen auf Reproduzierbarkeit im Schnitt 5 Minuten länger als bei Proband 1 (ca. 19 Minuten). Die Grenzen für *bemerkbare*, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe* sind im Mittel bei  $0,44 \pm 0,11$  dpt,  $1,0 \pm 0,17$  dpt bzw.  $1,45 \pm 0,18$  dpt. Die Mediane stimmen mit den Mittelwerten für jedes Kriterium mit einer Abweichung von 0,02 dpt überein. 50 % der Grenzwerte für Unschärfe befinden sich bei einem Astigmatismus von 0,34 bis 0,53 dpt, 0,88 bis 1,06 dpt bzw. 1,35 bis 1,6 dpt (*bemerkbar*, *tolerierbar*, *unakzeptabel*) und bewegen sich damit innerhalb einer Schwankungsbreite von 0,25 dpt (Abb.20). Bis auf Testglas 4 im Kriterium *unakzeptable Unschärfe* sind alle gemessenen Werte normalverteilt (Tabelle 16).

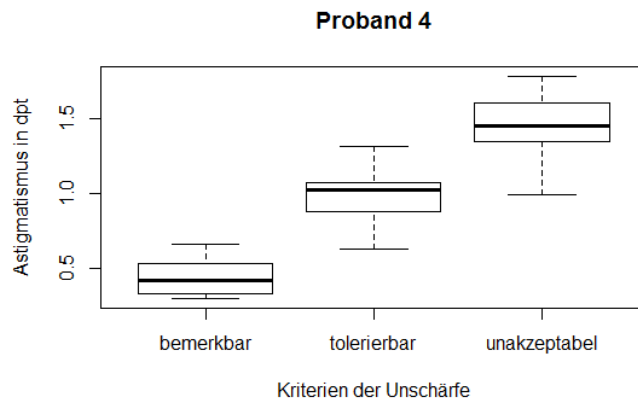


Abbildung 20: Unschärfegrenzen je Kriterium Proband 4

Tabelle 16: p-Werte Shapiro-Wilk-Test Proband 4

Testglas	bemerkbar	tolerierbar	unakzeptabel
1	0,244	0,1479	0,551
2	0,307	0,068	0,653
3	0,185	0,327	0,135
4	0,360	0,202	<b>0,014</b>

Die Tabellen 17 bis 19 zeigen die Ergebnisse für Blickwinkel der Sehbereichsbreiten und maximalen Astigmatismen in Gebrauchsstellung der Gläser 1 bis 4. Die Varianzanalyse zeigt, dass sich bei zwei von 14 Prüfungen die Mittelwerte des gemessenen Astigmatismus signifikant nicht unterscheiden (Testglas 4 *bemerkbare Unschärfe* und Testglas 2 *tolerierbare Unschärfe*). Die markierten Sehbereichsbreiten schwanken um mehr als 2° je Wiederholung, außer bei Testglas 1 und 4 beim Kriterium für *bemerkbarer Unschärfe*. Beim Proband 4 lassen sich nur für das Testglas mit dem geringsten Steigungsgradient des Astigmatismus (Testglas 4) *bemerkbare* Unschärfegrenzen reproduzieren.

Tabelle 17: Varianzprüfung bemerkbare Unschärfe Proband 4

	bemerkbare Unschärfe					
	Mittelwert		$\sigma$	Prüfgröße F	kritischer F-Wert	H0: Werte sind
Testglas	Blickwinkel (°)	$\Delta A_{max}$ (dpt)	$\Delta A_{max}$ (dpt)			
1	9,23	0,59	0,04	7,001	3,478	signifikant verschieden
	8,43	0,54	0,04			
	9,63	0,62	0,03			
	10,23	0,66	0,02			
	10,23	0,66	0,03			
2	10,70	0,46	0,03	10,387	3,478	signifikant verschieden
	11,23	0,48	0,04			
	10,43	0,44	0,01			
	9,57	0,41	0,02			
	12,30	0,53	0,01			
3	11,97	0,39	0,04	9,048	3,478	signifikant verschieden
	10,43	0,33	0,02			
	10,50	0,34	0,01			
	12,10	0,39	0,02			
	13,37	0,43	0,01			
4	12,43	0,32	0,05	1,993	3,478	nicht signifikant verschieden
	12,43	0,32	0,00			
	11,57	0,30	0,01			
	12,83	0,33	0,01			
	13,50	0,35	0,02			

Tabelle 18: Varianzprüfung tolerierbare Unschärfe Proband 4

	tolerierbare Unschärfe					
	Mittelwert		$\sigma$	Prüfgröße F	kritischer F-Wert	H0: Werte sind
Testglas	Blickwinkel (°)	$\Delta A_{max}$ (dpt)	$\Delta A_{max}$ (dpt)			
1	16,10	1,05	0,03	8,182	3,478	signifikant verschieden
	15,17	0,99	0,16			
	18,93	1,25	0,10			
	19,87	1,31	0,04			
	19,07	1,26	0,02			
2	22,80	1,01	0,06	2,221	3,478	nicht signifikant verschieden
	23,10	1,03	0,03			
	23,57	1,05	0,04			
	24,40	1,09	0,05			
	25,40	1,15	0,11			
3	22,37	0,75	0,02	11,937	3,478	signifikant verschieden
	25,47	0,87	0,10			
	29,47	1,03	0,05			
	27,17	0,93	0,02			
	30,10	1,05	0,08			
4	23,50	0,63	0,09	10,165	3,478	signifikant verschieden
	29,80	0,83	0,02			
	32,63	0,93	0,08			
	30,57	0,86	0,07			
	31,40	0,89	0,01			

Tabelle 19: Varianzprüfung unakzeptable Unschärfe Proband 4

	unakzeptable Unschärfe					
	Mittelwert		$\sigma$	Prüfgröße F	kritischer F-Wert	H0: Werte sind
Testglas	Blickwinkel (°)	$\Delta A_{\max}$ (dpt)	$\Delta A_{\max}$ (dpt)			
1	20,43	1,35	0,09	12,721	3,478	signifikant verschieden
	21,40	1,42	0,03			
	23,70	1,60	0,07			
	26,13	1,78	0,08			
	24,83	1,68	0,13			
2	31,67	1,49	0,11	3,777	3,478	signifikant verschieden
	31,53	1,48	0,03			
	33,47	1,60	0,05			
	34,27	1,64	0,05			
	33,30	1,59	0,05			
3	32,80	1,17	0,02	14,082	3,478	signifikant verschieden
	38,60	1,45	0,05			
	41,30	1,60	0,15			
	37,50	1,39	0,00			
	38,67	1,45	0,04			
4	34,23	0,99	0,05	-	-	Nicht normalverteilt
	42,03	1,31	0,05			
	42,43	1,33	0,03			
	42,97	1,35	0,13			
	41,80	1,30	0,04			

Im Wiederholungsprofil (Abb. 21) lässt sich ein gleichmäßiges Muster des Verlaufs erkennen. Die Abstände der Kriterien untereinander sind gleichmäßig. Legt man die Phasenverläufe je Wiederholung übereinander, kann zumindest für *bemerkbare und tolerierbare Unschärfe* eine Tendenz zur Wiederholbarkeit festgestellt werden (Abb. 22 bis 24). Würden die Phasen 1:1 aufeinander liegen, wäre der Testablauf reproduzierbar. Testglas 1 (großer Steigungsgradient) hat bei jeder Messung den höchsten Grenzwert empfundener Unschärfe in jedem Kriterium, welcher mit breiter werdendem Progressionskanal bis zum Glas 4 (kleiner Steigungsgradient) den niedrigsten Grenzwert erreicht. Abbildungen 25 bis 27 kann entnommen werden, dass die mittleren Grenzwerte für *bemerkbare Unschärfe* um 0,3 dpt, *tolerierbare Unschärfe* um 0,29 dpt und *unakzeptable Unschärfe* um 0,31 dpt von Glas 1 zu Glas 4 hinzu niedrigeren Grenzwerten für Unschärfe verschieben. Mit kleiner werdendem Steigungsgradienten des peripheren Astigmatismus setzen die Grenzwerte früher ein.

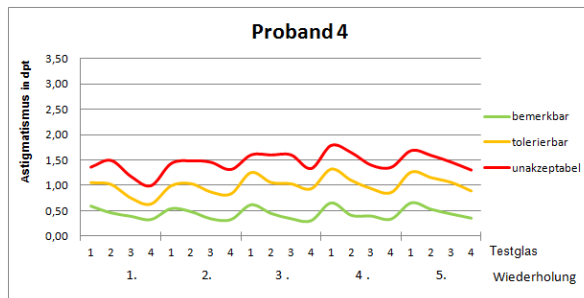


Abbildung 21: Wiederholungsprofil Proband 4

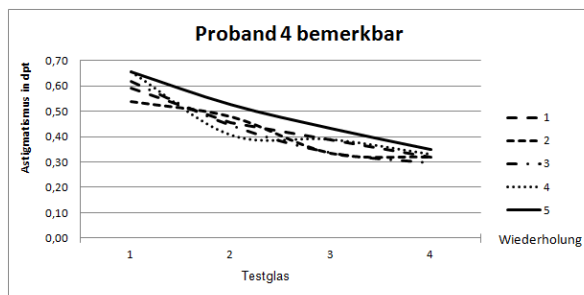


Abbildung 22: Phasenverlauf je Wiederholung bei bemerkbarer Unschärfe

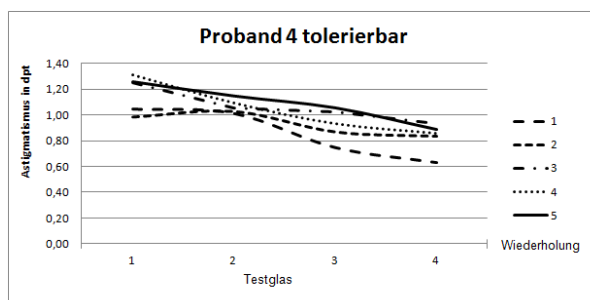


Abbildung 23: Phasenverlauf je Wiederholung bei tolerierbarer Unschärfe

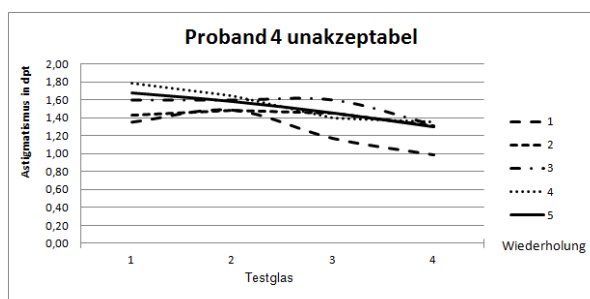
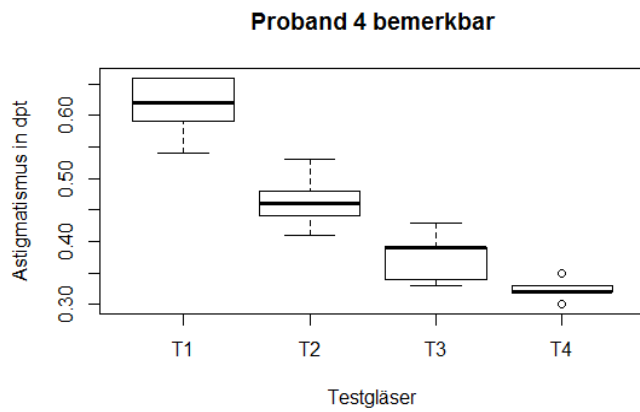
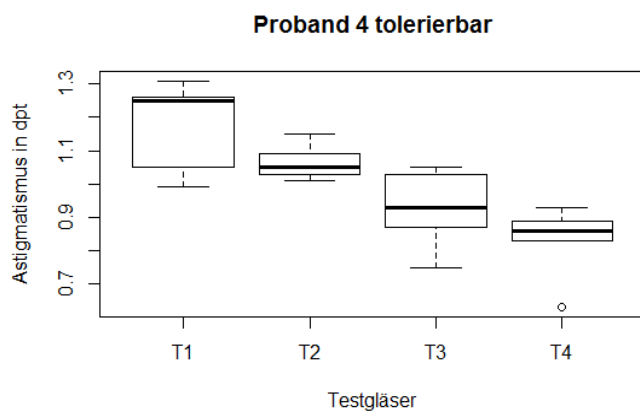


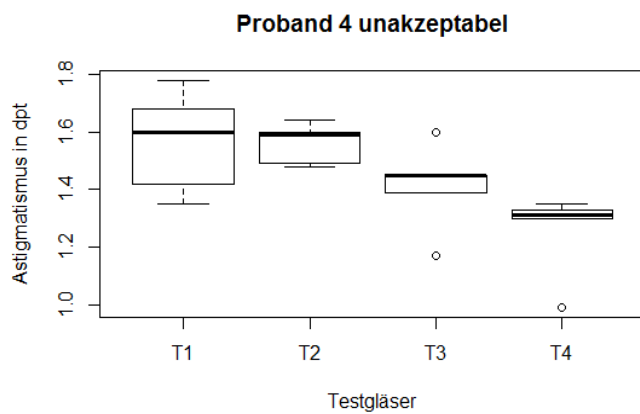
Abbildung 24: Phasenverlauf je Wiederholung bei unakzeptabler Unschärfe



**Abbildung 25: bemerkbare Unschärfegrenzen je Testglas Proband 4**



**Abbildung 26: tolerierbare Unschärfegrenzen je Testglas Proband 4**



**Abbildung 27: unakzeptable Unschärfegrenzen je Testglas Proband 4**

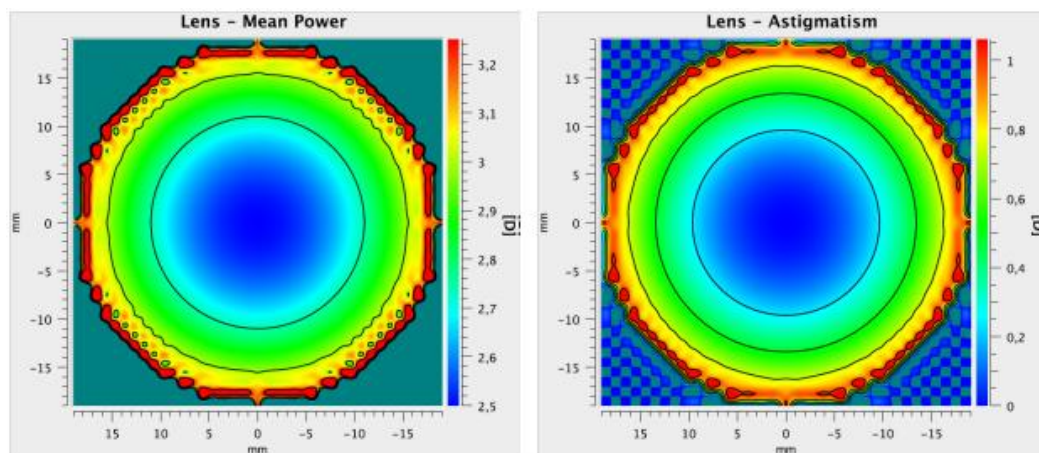


## 4 Diskussion

Diese Studie untersucht die subjektiven Grenzen für Unschärfetoleranz bei modifiziertem, gedrucktem Text und bei seitlichen Blicken durch Gleitsichtgläser. Mit dem Pretest soll versucht werden die definierten Kriterien für *bemerkbare*, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe* mittels Modifizierung eines Textes durch einen Weichzeichner-Filter zu simulieren und quantifizieren. Die Probanden sollen mit Hilfe der Pretest Karten für sich selbst überprüfen, wann das jeweilige Kriterium einsetzt und ob die Anforderungen an flüssiges Lesen noch möglich sind. Kritikpunkte dieses Pretest sind zum einen die fehlende Leistungsüberprüfung der Lesbarkeit, d.h. fehlende Arbeitsaufgaben, die bei dem modifizierten Text absolviert werden sollten, um Anzahl der gemachten Fehler und gebrauchte Zeit mit dem originalen Text zu vergleichen. Zum anderen ist ein Gauß'scher Weichzeichner-Filter nur eine Annäherung für Unschärfe; zur genauen Rückrechnung der Übertragungseigenschaften eines Objekts zum Bild ist beispielsweise eine Fourier Analyse notwendig.

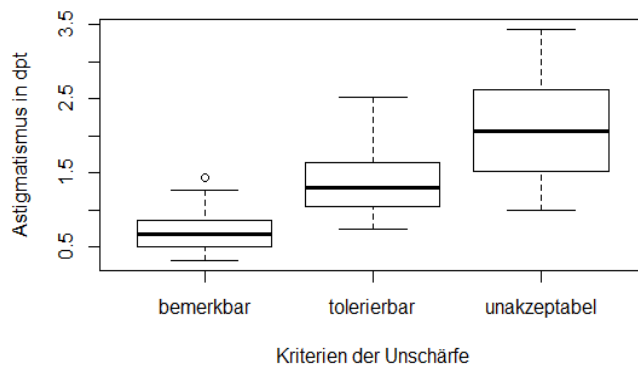
Der *Blurtest* ist als zuverlässige Methode zur Messung von Blickfeldbreiten beim Blick seitlich durch Gleitsichtgläser aus mehreren Gründen nicht geeignet. Neben Vergleichstests zur Messung von absoluten Schwellen für Unschärfeempfinden und zur Wiederholbarkeit von Messergebnissen, deren Nullhypothesen im Kapitel 3. widerlegt werden, reihen sich noch weitere Kritikpunkte an der Methode. Zum einen fehlt es dem *Blurtest* an Objektivität. Alle Beurteilungskriterien beziehen sich auf subjektive Empfindungen, es werden auch hier keine messbaren Leistungen überprüft; weder Sehleistung noch Arbeitsaufgaben, die erfüllt werden müssen. Zum anderen sind Fehlsichtige Probanden, die mit torischen Kontaktlinsen korrigiert sind, nicht zum Testen geeignet, da die Kontaktlinse bei extremen Blickbewegungen die Stabilität der Achslage zu verlieren scheint. Selbst wenn die Kontaktlinse ihre Stabilität halten könne, spielt die Listing'sche Regel bei Augenbewegungen immer eine Rolle. Diese besagt, dass Augen unter Bewegung, also bei Vergenzen und Versionen, immer auch Rotationen (Verrollungen) ausgesetzt sind (Listing und Schwarz 1905). So kann

u.U. die Achslage des Astigmatismus bei seitlichen Blicken von der Achslage der Fernkorrektur in der Nullposition abweichen. Fehlsichtige, die keine Kontaktlinsen zur Korrektur tragen sind ebenfalls nicht geeignet, da sich die Astigmatismen schiefer Bündel beim peripheren Blick durch die korrigierenden Messgläser zum Astigmatismus der Testgleitsichtgläser addieren würden, was den Aussagewert über die tatsächlichen Blickfeldbreiten verfälschen würde. Ähnlich verhält es sich mit dem Abstandsglas, welches die Probanden zusätzlich zum Testglas eingesetzt bekommen um Akkommodation und „Pupillenspiel“ einzuschränken. Der Wert des Astigmatismus, bei dem das jeweilige Kriterium für Unschärfe einsetzt, bezieht sich bei den Berechnungen im Kapitel 3 nur auf die Testgläser. Bei einem Beobachtungsabstand von 40 cm beträgt das Abstandsglas für eine emmetrope Testperson +2,5 dpt. Abbildung 28 zeigt die grafischen Darstellungen der Wirkungsänderungen des sphärischen Abstandsglases zur Peripherie hin. Bei Blicken ab 9 bis 10 mm peripher des optischen Mittelpunktes addiert sich ein Astigmatismus von 0,25 dpt schräger Achslage auf den unerwünschten Astigmatismus der Gleitsichtgläser hinzu; bei 14 mm ein Astigmatismus von 0,5 dpt. Der eigentliche Astigmatismus in Gebrauchsstellung bezieht sich somit immer auf die Kombination Abstandsglas-Testgleitsichtglas.



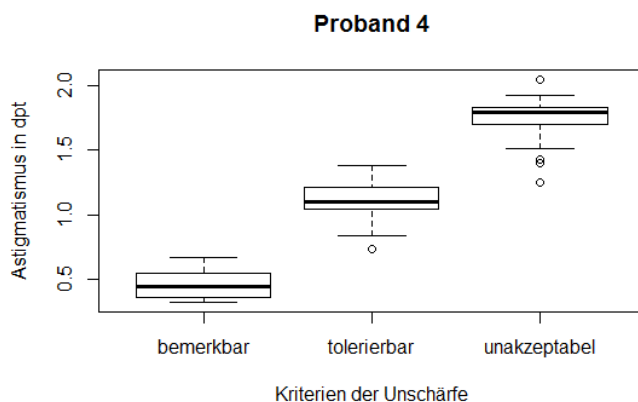
**Abbildung 28: grafische Darstellung der Wirkungsänderung des Abstandsglases peripher des optischen Mittelpunktes; links: Gesamtwirkung, rechts: astigmatische Wirkung**

Unter der Annäherung, dass beide Gläser hintereinander in der Messbrille positioniert sind und das gesamte Linsensystem ohne Abstand der Linsen betrachtet wird, ergeben sich folgende Korrektionswerte für die Unschärfegrenzen in der Probandengruppe: Die Werte für *eben bemerkbare Unschärfe* liegen im Mittel über alle Probanden bei den Testgläsern 1 bis 4 bei einem Astigmatismus in Gebrauchsstellung von  $0,70 \pm 0,3$  dpt; mit 0,05 dpt höher als ohne Berücksichtigung des Abstandsglases. Deutlich höher als die Werte von Atchison et. al 2005, die *bemerkbare Unschärfe* bei der Buchstabengröße von Visus 1,0 bei  $\pm 0,33$  dpt bzw. Visus 0,2 bei 0,56 dpt (Pupillenweite 3 mm) feststellen. Eine höhere Differenz lässt sich bei *tolerierbarem* und *unakzeptablem* Unschärfeempfinden feststellen; *tolerierbare Unschärfe* liegt im Mittel bei einem Astigmatismus von  $1,37 \pm 0,50$  dpt und *unakzeptable Unschärfe* bei  $2,06 \pm 0,74$  dpt; d.h. 0,21 dpt bzw. 0,42 dpt höhere Grenzen für Unschärfe unter Berücksichtigung der Fehler des Abstandsglases. Mittelwert und Median stimmen mit einer Abweichung von maximal 0,07 dpt überein (Abb.29). Mit den Kriterien *tolerierbar* und *unakzeptabel* steigen die Korrekturwerte, da die Astigmatismen schiefer Bündel bei größeren Blickwinkeln ansteigen. Die Daten sind weiterhin normalverteilt. An der Prüfung zur Nullhypothese  $H_0$  ändert sich nichts, die Grenzen für das jeweilige Unschärfekriterium unterscheiden sich weiterhin signifikant unter den Probanden. Der Median für *tolerierbare Unschärfe*, unter Berücksichtigung des Abstandsglases, liegt bei 1,30 dpt und liegt damit über den Werten von Fischer 1997, der bis zur Isoastigmatismuslinie von 1 dpt den Bereich „klaren komfortablen Sehens“ feststellen konnte.



**Abbildung 29: Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler des Abstandsglases aller Probanden**

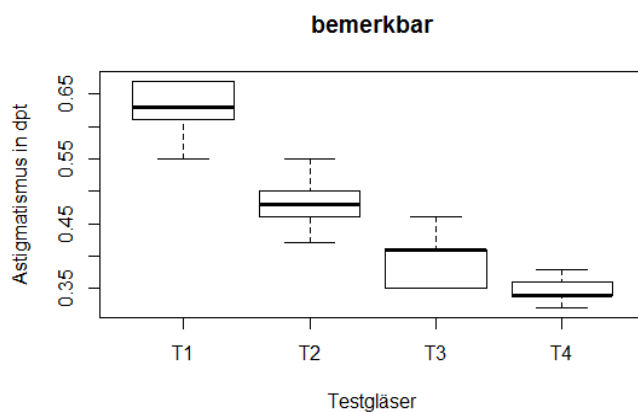
Korrigiert man die Messdaten für den Test auf Reproduzierbarkeit von Proband 4 in Bezug auf das Abstandsglas, werden die Grenzen wie bei der Probandengruppe ebenfalls zu höheren Werten korrigiert. Die Grenzen für *bemerkbare*, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe* setzen im Mittel über alle Gläser bei  $0,46 \pm 0,11$  dpt,  $1,11 \pm 0,15$  dpt und  $1,73 \pm 0,19$  dpt ein (Abb. 30); d.h. um 0,02 dpt, 0,11 bzw. 0,28 dpt erhöhte Grenzwerte. Die Mittelwerte entsprechen weiterhin den Meridianen mit einer Abweichung  $< 0,06$  dpt.



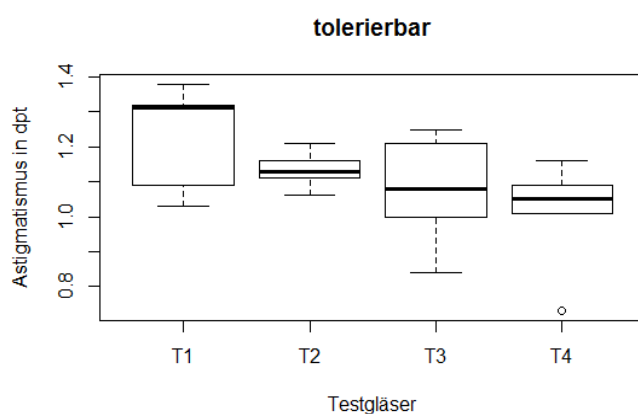
**Abbildung 30: Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler des Abstandsglases Proband 4**

Normalverteilung (Shapiro-Wilk) über alle Gläser liegt nur noch beim Kriterium *bemerkbar* ( $p=0,0546$ ) und *tolerierbar* ( $p=0,527$ ) vor, wobei nur die Mittelwerte für *tolerierbare Unschärfe* von Testglas 1 bis 4 bei den Wiederholungen signifikant nicht verschieden sind (ANOVA,  $F:2,08 < F$ -

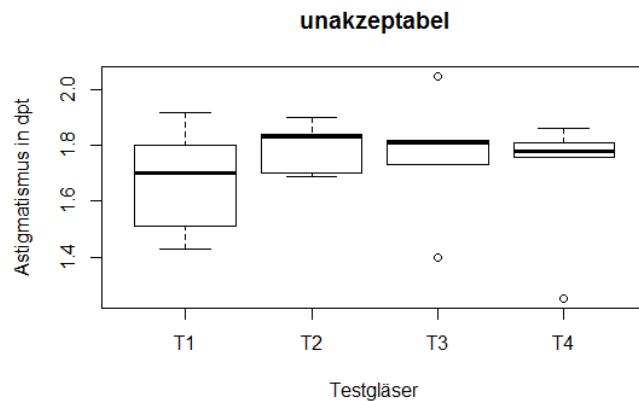
kritisch: 3,23). Beim Kriterium *bemerkbar* bleibt die Differenz der Grenzwerte von Testglas 1 zu Testglas 4 von ca. 0,3 dpt erhalten. Die Verschiebung der Grenzwerte *bemerkbarer Unschärfe* hin zu niedrigen Werten bei Erhöhung der Progressionskanalbreite (kleiner Steigungsgradient) ist durch Berücksichtigung der zusätzlichen Astigmatismen im Abstandsglas nicht zu erklären (Abb.31). Bei *tolerierbarer* und *unakzeptabler Unschärfe* verkleinern sich durch die Berücksichtigung der Fehler des Abstandsglases die Differenzen der Mittelwerte von Testglas 1 zu Testglas 4 von 0,34 dpt auf 0,2 dpt bzw. von 0,31 dpt auf 0,02 dpt (Abb.32 und 33). Es bleibt weiterhin die Frage offen, ob die Grenzen empfundener Unschärfe unabhängig vom Steigungsgradienten des unerwünschten Astigmatismus gleich bleiben.



**Abbildung 31: bemerkbare Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler Abstandsglas Proband 4**

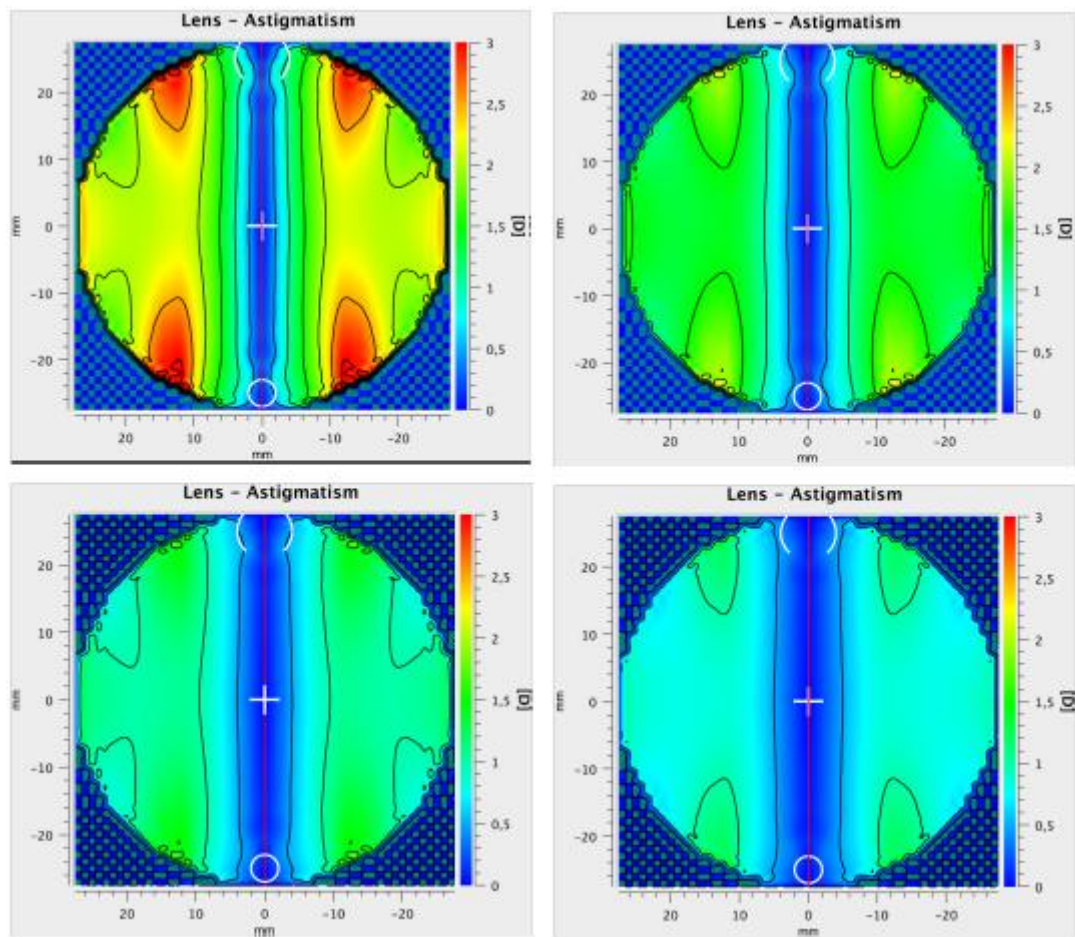


**Abbildung 32: tolerierbare Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler Abstandsglas Proband 4**



**Abbildung 33: unakzeptable Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler Abstandsglas Proband 4**

Ein weiterer Kritikpunkt an der Aussagefähigkeit der Unschärfegrenzen ist, dass bei den Berechnungen mit den Tesgläsern 1 bis 4 theoretisch von einem linearen Wirkungsanstieg nicht nur vertikal im Stärkenverlauf, sondern auch horizontal im Wirkungsanstieg des peripheren Astigmatismus ausgegangen wird. Tatsächlich ist der lineare Wirkungsanstieg nur in Nähe der Hauptlinie vorhanden (Abb 34). Nur innerhalb der Zone von  $\pm 10$  mm peripher der Hauptlinie lassen sich aufgrund von markierten Sehbereichsbreiten Rückschlüsse auf den tolerierbaren Astigmatismus durch den Satz von Minkwitz ziehen. Außerhalb des Bereich muss durch spezielle Rechenprogramme die nicht lineare Verteilung des Flächenastigmatismus der Gleitsichtgläser und der Abbildungsfehler des Abstandsglases bei seitlichem Blick berechnet werden um Aussagen über Höhe und Achslage des Astigmatismus in Gebrauchstellung treffen zu können. Zusätzlich muss die Zentrierung vor und während des Tests genau stimmen. d.h. bei Blick geradeaus auf den Fixationspunkt muss durch den optischen Mittelpunkt von 0 dpt geschaut werden, sonst addieren sich die negativen oder positiven sphärischen Wirkungen oberhalb und unterhalb des optischen Mittelpunktes als zusätzliche Fehler hinzu. Bloße Augenkontrolle des Prüfers detektiert nur große Kopfneigungen; ein Gerät zur Überwachung der Kopf- und Augenbewegungen detektieren minimale Änderungen (Headmover/ Eyemover).



**Abbildung 34: grafische Darstellung des Flächenastigmatismus peripher des optischen Mittelpunktes der Testgleitsichtgläser 1 (links oben), 2 (rechts oben), 3 (links unten) und 4 (rechts unten)**

Ein weiteres Thema scheinen individuelle Erfahrungswerte zur Unschärfempfindung eine Rolle zu spielen. Proband 1 ist die einzige Person mit „Erfahrungen“ bei Unschärfe, da sie mit -3,25 dpt kurzsichtig ist. In 93 % der Fälle hat Proband 1 die höchsten Toleranzgrenzen im Vergleich zur Gruppe. Er kennt den Sinneseindruck eines verschwommenen Gegenstandes ohne Brille/ Kontaktlinse im Vergleich zum scharfen, konturenreichen Bild mit Brille/ Kontaktlinse. D.h. die Informationen zu den Bilddetails sind im „scharfen“ und „unscharfen“ Zustand abgespeichert. Andererseits gibt er im Mittel mit 1.75 Punkten die geringste Toleranzbereitschaft an unscharfe Texte im Alltag Lesen zu wollen/können im Vergleich zur Gruppe. Um eine genauere Aussage treffen zu können fehlen allerdings Vergleichsmessung mit weiteren Fehlsichtigen. Ebenfalls fehlen Vergleichswerte für Probanden mit Presbyopie, da, wie Kline et al. schon 1999 feststellen, ältere Proban-

den eher in der Lage sind, optisch degradierten/ verschwommenen Text zu erkennen.

Dennoch scheinen sich die Probanden ihrer eigenen Toleranzspanne bewusst zu sein. Der Korrelationskoeffizient zwischen der gefühlten und gemessenen Sehbereichsbreite des gesamten Toleranzbereiches zwischen *bemerkbar* und *unakzeptabel* beträgt  $r_{\text{Pearson}} = 0,59$ , impliziert einen mittelstarken Zusammenhang und ist mit der Literatur (Woods et al. 2010, S. 6079) vergleichbar.



## 5 Schlussfolgerung

Der *Blurtest* ist keine Methode mit der reproduzierbar Sehbereichsbreiten in Gleitsichtgläsern gemessen werden können. Die markierten Sehbereichsbreiten korrelieren mit dem horizontalen Anstieg des unerwünschten Astigmatismus, lassen sich bei Wiederholungsmessungen am *Blurtest* jedoch nicht auf 2° Schwankungsbreite reproduzierbar nachweisen. Absolute Schwellen für bemerkbare, *tolerierbare* und *unakzeptable Unschärfe* sind unter den Probanden nicht feststellbar. Die Unschärfegrenzen lassen sich nur innerhalb einer Zone von ca.  $\pm 10$  mm um die Hauptlinie der speziellen Gleitsichtgläser mit dem Satz von Minkwitz zurückrechnen, außerhalb des Bereichs liegt keine lineare Verteilung des unerwünschten Flächenastigmatismus mehr vor. Die errechneten Grenzen des unerwünschten Astigmatismus in den Gleitsichtgläsern müssen durch die zusätzlichen Abbildungsfehler beim Blick schräg durch das Abstandsglas korrigiert werden, da sich ab ca. 9 bis 10 mm peripher vom optischen Mittelpunkt ein Astigmatismus obliquus von 0,25 dpt bzw. 0,5 dpt (13 mm) dazu addiert. Unter der Annahme dieser Korrektur ergeben sich höhere Unschärfegrenzen als in der Literatur: für *bemerkbare, tolerierbare und unakzeptable Unschärfe* ergeben sich Werte für den Astigmatismus in Gebrauchsstellung von  $0,70 \pm 0,3$  dpt,  $1,37 \pm 0,50$  dpt und  $2,06 \pm 0,74$  dpt. Unschärfedefinition und Toleranzschwellen scheinen sehr individuell und von mehr Faktoren abhängig zu sein als von der Sehschärfe.

## 6 Ausblick

Für weitere Untersuchungen sollten folgende Überlegungen berücksichtigt werden:

Für mehr Objektivität sollte eine Überprüfung der Seh- und Leseleistung erfolgen bzw. sollten Ergebnisse von Arbeitsaufgaben auf Fehler und benötigte Zeit untersucht werden; angelehnt an die Arbeiten von Selenow et al. 2002. Statt dem Vergleich von monokularen Bildschirmarbeitsplatzbrillen und Gleitsichtbrillen, können die Gleitsichtgläser unterschiedlicher Progressionskanalbreiten miteinander verglichen werden. Desweiteren sollte nur im Bereich des linearen Wirkungsanstiegs der Testgleitsichtgläser, dh. bis ca.  $\pm 10$  mm peripher des optischen Mittelpunktes gemessen werden. Offene bleibt weiterhin die Frage, ob die Grenzen empfundener Unschärfe unabhängig vom Steigungsgradienten des unerwünschten Astigmatismus immer gleich bleiben? Außerdem übersteigt das Testgleitsichtglas Nr.4 mit 5 mm Progressionskanalbreite für das Kriterium *tolerierbar* und *unakzeptabler* die natürlichen Gebrauchsblickwinkel von  $20^\circ$  bis  $30^\circ$  und kann daher bei weiteren Tests weggelassen werden. Ältere Menschen mit Presbyopie sind besser im Erkennen von defokussiertem (optisch verschwommenen) Text als junge Menschen, sowohl bei Tages- als auch bei Nachtbeleuchtung (Kline et al. 1999). Interessant sind weitere Tests mit einer presbyopen Versuchsgruppe ohne Fehlsichtigkeit und ohne Abstandsglas, da Akkommodation und Pupillenspiel im Alter keine Rolle spielen, aber auch im Vergleichstest mit einer stark fehlsichtigen Versuchsgruppe. Bei beiden Probandengruppen stellt der Erfahrungswert mit optisch degradierten Sinneseindrücken einen Einflussfaktor auf Toleranzgrenzen dar. Der Abstand des Monitors müsste dazu variiert werden. Desweiteren wurden bis jetzt nur die horizontalen Sehbereichsbreiten gemessen, die Tests für Grenzen nach oben und unten sind noch zu klären. Offen bleibt auch der Vergleich statischer und dynamischer Methoden. Stimmt die Grenze gerade noch tolerierbarer Unschärfe mit dem Punkt überein, ab dem der Kopf mit bewegt wird, um wieder deutlich zu sehen?

## 7 LiteraturverzeichnisLiteraturverzeichnis

DIN EN ISO 9801(Ophthalmische Instrumente – Refraktionsgläser), 2010-04:  
Ophthalmische Instrumente – Refraktionsgläser.

Atchison, David A.; Charman, W. N.; Woods, R. (1997): Subjective Depth-of-Focus of the Eye. In: *Optometry and Vision Science* (Vol.74; No.7), S. 511–520, zuletzt geprüft am 13.11.2014.

Atchison, David A.; Fisher, Scott W.; Pedersen, Carol A.; Ridall, P. Gareth (2005): Noticeable, troublesome and objectionable limits of blur. In: *Vision Res.* 45 (15), S. 1967–1974. DOI: 10.1016/j.visres.2005.01.022.

Atchison, David A.; Guo, Huanqing; Charman, W. N.; Fisher, S. W. (2009): Blur limits for defocus, astigmatism and trefoil. In: *Vision Res.* 49 (19), S. 1–40. DOI: 10.1016/j.visres.2009.07.009.

Chung, Susana; Jarvis, Samuel H.; Cheung, Sing-Hang (2007): The effect of dioptric blur on reading performance. In: *Vision Res.* 47 (12), S. 1584–1594. DOI: 10.1016/j.visres.2007.03.007.

Ciuffreda, Kenneth J.; Selenow, Arkady; Wang, Bin; Vasudevan, Balamurali; Zikos, George; Ali, Steven R. (2006): "Bothersome blur": a functional unit of blur perception. In: *Vision Res.* 46 (6-7), S. 895–901. DOI: 10.1016/j.visres.2005.10.004.

Diepes, Heinz (2004): Refraktionsbestimmung. 3., komplett überarb. Aufl. Heidelberg: DOZ-Verlag Optische Fachveröffentlichung.

Fisher, Scott W. (1997): Relationship between Contour Plots and the Limits of "Clear and Comfortable" Vision in the Near Zone of Progressive Addition Lenses. In: *Optometry and Vision Science - American Academy of Optometry* (Vol 74, No.7), S. PP.527-531, zuletzt geprüft am 26.10.2014.

Jahnke, M.; Wirbelauer, C.; Pham, D. T. (2006): Einfluss des Alters auf die optischen Aberrationen des menschlichen Auges. In: *Der Ophthalmologe : Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft* 103 (7), S. 596–604. DOI: 10.1007/s00347-006-1361-4.

Jung, Gloria H.; Kline, Donald W. (2010): Resolution of blur in the older eye: neural compensation in addition to optics? In: *Journal of Vision* 10 (5), S. 1–9.

Kalder, Dieter (2003): Gleitsichtgläser. Mainz a. Rh.: WVAO (WVAO Bibliothek, 16).

Kline, Donald W.; Buck, Kimberly; Sell, Yvonne; Bolan, Thomas L.; Dewar, Robert E. (1999): Older Observers' Tolerance of Optical Blur. Age Differences in the Identification of Defocused Text Signs. In: *hum factors* 41 (3), S. 356–364. DOI: 10.1518/001872099779611049.

Legge, G. E.; Mullen, K.,T.; Woo, G.,C.; Campbell, F.,W. (1987): Tolerance to visual defocus. In: *J. Optical Society of America* 1987, 1987 (Vol.4; No.5), S. 851–863, zuletzt geprüft am 12.11.2014.

Listing, J. B.; Schwarz, O. (1905): Beitrag zur Physiologischen Optik (1905): Kessinger Pub Co 2010.

Marcos, Susana; Moreno, Esther; Navarro, Rafael (1999): The depth-of-field of the human eye from objective and subjective measurements. In: *Vision Research* 39 (12), S. 2039–2049. DOI: 10.1016/S0042-6989(98)00317-4.

Miller, Anthony, D.; Kris, Michy, J.; Griffiths, Andrew, C. (1997): Effect of Small Focal Errors on Vision. In: *Optometry and Vision Science* (Vol.74; No.7), S. 521–526, zuletzt geprüft am 05.11.2014.

Minkwitz, G. (1963): Über den Flächenastigmatismus Bei Gewissen Symmetrischen Asphären. In: *Optica Acta: International Journal of Optics* 10 (3), S. 223–227. DOI: 10.1080/713817794.

Minkwitz, G. (2005): Ergänzende Bemerkungen zum sogenannten "Satz von Minkwitz". In: *Deutsche Optikerzeitung - DOZ* (09), S. 44–48, zuletzt geprüft am 23.03.2015.

Mühlendyck, Hermann (1990): Augenbewegung und visuelle Wahrnehmung. Physiologische psychologische und klinische Aspekte; 20 Tabellen. Stuttgart: Enke (Bücherei des Augenarztes, 121).

Pitts, D. G. (1982): The effects of aging on selected visual functions: Dark adaption, visual acuity, stereopsis, and brightness contrast. In: R. Sekuler, D.

Kline und K. Dismukes (Hg.): Aging and human visual function. New York, S. 131–159.

Presser, Harald (2001): Brille und Auge. Ametropien, Presyopie, Binokularsehen, Brillengläser, Kontaktlinsen, Auswahlkriterien. 3. Aufl. Stephanskirchen: CHK-Verlag.

Selenow, Arkady; Bauer, E.; Ali, Steven R.; Spencer, L. W.; Ciuffreda, Kenneth J. (2002): Assessing Visual Performance with Progressive Addition Lenses. In: *Optometry and Vision Science - American Academy of Optometry* (Vol.79, No.8), S. PP. 502-505, zuletzt geprüft am 27.10.2014.

Sullivan, C. M.; Fowler, C. W.: Grating Visual Acuity Testing as a Means of Psychophysical Assessment of Progressive Addition Lenses. In: *Optometry and Vision Science* 1989 (Vol.66; No.9), S. 565–572, zuletzt geprüft am 13.11.2014.

Villegas, Eloy A.; Artal, Pablo (2006): Visual acuity and optical parameters in progressive-power lenses. In: *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry* 83 (9), S. 672–681. DOI: 10.1097/01.opx.0000232818.37832.ee.

Winn, B.; Whitaker, D.; Elliot, D. B.; Phillips, N. J. (1994): Factors Affecting Light-Adapted Pupil Size in Normal Human Subjects. In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* (Vol.35;No.3), S. 1132–1137, zuletzt geprüft am 17.11.2014.

Woods, Russell L.; Colvin, C. Randall; Vera-Diaz, Fuensanta A.; Peli, Eli (2010): A Relationship between Tolerance of Blur and Personality. In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 51 (11), S. 6077–6082. DOI: 10.1167/iovs.09-5013.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel Pretest Vorlage mit 1,0 px Weichzeichnerradius .....	6
Abbildung 2: Programmmaske <i>Blur Test</i> .....	8
Abbildung 3: Vorlage mit Fixationspunkt und Markern des <i>Blur Tests</i> .....	9
Abbildung 4: Grafische Darstellung Flächenastigmatismus (links) und vertikaler Stärkenanstieg (rechts) Testglas Nr. 2 .....	11
Abbildung 5: Testglas Nr.2 in Metallschmalrandfassung.....	13
Abbildung 7: Messbrilleneinstellung .....	14
Abbildung 6: Messaufbau .....	14
Abbildung 8: Schema eines Badal Lens Optometer (Atchison 2005) .....	18
Abbildung 9: Zusammenhang Pretest und Toleranz für Unschärfe im Alltag .....	27
Abbildung 10: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden .....	28
Abbildung 11: bemerkbare Unschärfegrenzen je Testglas für aller Probanden.....	29
Abbildung 12: tolerierbare Unschärfegrenzen je Testglas aller Probanden .....	29
Abbildung 13: unakzeptable Unschärfegrenzen je Testglas aller Probanden .....	30
Abbildung 14: Korrelation Introspection grade und Toleranzbereichsbreite .....	36
Abbildung 15: Unschärfegrenzen je Kriterium Proband 1 .....	37
Abbildung 16: Wiederholungsprofil Proband 1 .....	40
Abbildung 17: Phasenverlauf der Wiederholung bei bemerkbarer Unschärfe .....	40
Abbildung 18: Phasenverlauf je Wiederholung bei tolerierbarer Unschärfe .....	41
Abbildung 19: Phasenverlauf je Wiederholung bei unakzeptabler Unschärfe .....	41
Abbildung 20: Unschärfegrenzen je Kriterium Proband 4 .....	42
Abbildung 21: Wiederholungsprofil Proband 4 .....	45
Abbildung 22: Phasenverlauf je Wiederholung bei bemerkbarer Unschärfe .....	45
Abbildung 23: Phasenverlauf je Wiederholung bei tolerierbarer Unschärfe .....	45
Abbildung 24: Phasenverlauf je Wiederholung bei unakzeptabler Unschärfe .....	45
Abbildung 25: bemerkbare Unschärfegrenzen je Testglas Proband 4 .....	46
Abbildung 26: tolerierbare Unschärfegrenzen je Testglas Proband 4 .....	46
Abbildung 27: unakzeptable Unschärfegrenzen je Testglas Proband 4 .....	46
Abbildung 28: grafische Darstellung der Wirkungsänderung des Abstandsglases peripher des optischen Mittelpunktes; links: Gesamtwirkung, rechts: astigmatische Wirkung .....	48
Abbildung 29: Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler des Abstandsglases aller Probanden .....	50
Abbildung 30: Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler des Abstandsglases Proband 4 .....	50
Abbildung 31: bemerkbare Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler Abstandsglas Proband 4 .....	51

---

Abbildung 32: tolerierbare Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler Abstandsglas Proband 4 .....	51
Abbildung 33: unakzeptable Unschärfegrenzen inkl. Abbildungsfehler Abstandsglas Proband 4 .....	52
Abbildung 34: grafische Darstellung des Flächenastigmatismus peripher des optischen Mittelpunktes der Testgleitsichtgläser 1 (links oben), 2 (rechts oben), 3 (links unten) und 4 (rechts unten) .....	53
Abbildung 35: Vorlagen Pretest mit Weichzeichnerradius 0,25-1,5 px .....	XXII
Abbildung 36: Vorlagen Pretest mit Weichzeichnerradius 1,75-3,0 px .....	XXIII
Abbildung 37: Grafische Darstellung Flächenastigmatismus (links) und vertikaler Stärkenanstieg (rechts) Testglas Nr. 1 .....	XXV
Abbildung 38: Grafische Darstellung Flächenastigmatismus (links) und vertikaler Stärkenanstieg (rechts) Testglas Nr. 3 .....	XXV
Abbildung 39: Grafische Darstellung Flächenastigmatismus (links) und vertikaler Stärkenanstieg (rechts) Testglas Nr. 4 .....	XXV
Abbildung 40: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden Glas 1 .....	XXVI
Abbildung 41: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden Glas 2 .....	XXVI
Abbildung 42: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden Glas 3 .....	XXVI
Abbildung 43: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden Glas 4 .....	XXVII

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Refraktionswerte, Sehleistung und Pupillenparameter der Probanden .....	5
Tabelle 2: Übersicht der Blickfeldbreiten von Testglas 1 bis 4 .....	11
Tabelle 3: Ergebnisse <i>Pretest</i> .....	26
Tabelle 4: Bewertung der Toleranzbereitschaft auf einer Skala von 0-5 .....	27
Tabelle 5: p-Werte Shapiro-Wilk-Test für alle Probanden .....	31
Tabelle 6: Varianzprüfung Astigmatismus für bemerkbare Unschärfe .....	32
Tabelle 7: Varianzprüfung Astigmatismus für tolerierbare Unschärfe .....	32
Tabelle 8: Varianzprüfung Astigmatismus für unakzeptable Unschärfe .....	33
Tabelle 9: Varianzprüfung max. Blickwinkel je Testglas für bemerkbare Unschärfe...	34
Tabelle 10: Varianzprüfung max. Blickwinkel je Testglas für tolerierbare Unschärfe ..	34
Tabelle 11: Varianzprüfung max. Blickwinkel je Testglas für unakzeptable Unschärfe	35
Tabelle 12: p-Werte Shapiro-Wilk-Test Proband 1 .....	37
Tabelle 13: Varianzprüfung bemerkbare Unschärfe Proband1 .....	38
Tabelle 14: Varianzprüfung tolerierbare Unschärfe Proband 1 .....	39
Tabelle 15: Varianzprüfung unakzeptable Unschärfe Proband 1 .....	39
Tabelle 16: p-Werte Shapiro-Wilk-Test Proband 4 .....	42
Tabelle 17: Varianzprüfung bemerkbare Unschärfe Proband 4 .....	43
Tabelle 18: Varianzprüfung tolerierbare Unschärfe Proband 4 .....	43
Tabelle 19: Varianzprüfung unakzeptable Unschärfe Proband 4 .....	44



---

# Anhang

Daten CD



**Schriftliche Einverständniserklärung der Testperson zur Teilnahme an einer wissenschaftlichen Studie**

- Bitte lesen Sie dieses Formular sorgfältig durch.
- Bitte stellen Sie jederzeit Fragen, falls Sie etwas nicht verstanden haben oder wissen möchten.

**Titel der Studie**

„Messung der Sehbereichsbreiten bei Gleitsichtgläsern über Unschärfemarkierungen“

**Name der Institution**

Hochschule Aalen, Anton-Huber-Str. 23, 73430 Aalen

**Betreuer**

Name, Vorname: Prof. Dr. Baumbach, Peter

**Bachelorand**

Name, Vorname: Kostial, Stephanie

**Testperson**

Name, Vorname:

**Probanden-Nr.**

- Ich wurde von der verantwortlichen Person für die oben genannte Studie vollständig über Wesen, Bedeutung und Tragweite des Forschungsprojekts aufgeklärt. Ich hatte die Möglichkeit Fragen zu stellen und habe die Antworten verstanden.
- Mir ist bekannt, dass meine Daten anonym gespeichert und ausschließlich für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden.
- Ich habe eine Kopie dieser Einverständniserklärung erhalten.
- Ich erkläre hiermit meine freiwillige Teilnahme an dieser Studie.

Ort, Datum	Unterschrift der Testperson
	Unterschrift Betreuer bzw. Bachelorand

**Probandeninformation umseitig**

**Information für Probanden****Titel der Studie**

„Messung der Sehbereichsbreiten bei Gleitsichtgläsern über Unschärfemarkierung“

**Name der Institution**

Hochschule Aalen, Anton-Huber-Str. 23, 73430 Aalen

**Betreuer**

Name, Vorname: Prof. Dr. Baumbach, Peter

**Bachelorand**

Name, Vorname: Kostial, Stephanie

**Kontakt Daten**

stephanie\_kostial@web.de

**Ausgangslage:**

Gleitsichtgläser stellen im Alltag eine universelle Alternative zur einzelnen Fern-, Computer- und Nahbrille dar, da bei diesem multifokalen Glas alle Entfernungen abgedeckt sind. Durch den stetigen Anstieg der Werte von Ferne zur Nähe werden zusätzlich unerwünschte Unschärfebereiche (Flächenastigmatismus) induziert, die zur Peripherie des Glases hin zunehmen und ein deutliches Erkennen von Buchstaben oder Gegenständen erschweren.

**Voraussetzungen:**

Bei jeder Testperson wird vor der eigentlichen Studie die Tauglichkeit zum Versuch geprüft. Dies setzt eine Sehleistungsüberprüfung und einen Fragebogen zu personengebundenen Angaben wie Alter, Vorerkrankungen oder Toleranzempfinden bei Unschärfe voraus. Nur rechtsichtige bzw. mit Kontaktlinsen vollkorrigierte Personen ohne Augenerkrankungen mit einer Sehleistung (einäugig) gleich oder besser als 1,0 sowie uneingeschränkter Augenbewegung sind für die Studie geeignet.

**Ziel und Versuchsdurchführung:**

Da bislang nur unzureichende Erkenntnisse bezüglich der Unschärfegrenzen vorliegen, dh. die Toleranzspanne bis zu welcher Höhe der induzierten dioptrischen Unschärfe in Gleitsichtgläsern zum Rand hin uneingeschränktes dauerhaftes Lesen noch möglich ist, sollen diese Toleranzgrenzen und damit auch Blickfeldbreiten näher untersucht werden. Verwendet werden 4 Test-Gleitsichtgläser mit linearem Wirkungsanstieg und unterschiedlicher Kanalbreite (Progression), deren Wirkung im geometrischen Mittelpunkt 0 dpt hat. Dargestellt wird ein sinnfreier Text auf einem Bildschirm mit Wörtern zu je 4 Buchstaben, dessen Lesbarkeit durch horizontales Einstellen von beweglichen Markierungen am Bildschirm unter verschiedenen Kriterien beurteilt wird:



1."gerade eben bemerkbare Unschärfe": Position (der Markierungslinien) horizontal des Fixationspunktes, bei der die erste Veränderung in Klarheit und Schärfe der Buchstaben bemerkbar ist; die Buchstaben sollten immer noch flüssig lesbar sein.

2."gerade noch tolerierbare Unschärfe": Position (der Markierungslinien) horizontal des Fixationspunktes, bei dem man die ersten (Lese-)Probleme bekommt durch den Mangel an Klarheit der Buchstaben, es aber dauerhaft tolerierbar ist. Die Buchstaben sollten aber noch klar genug zum flüssigen Lesen sein.

3."unakzeptable Unschärfe": Position (der Markierungslinien), horizontal des Fixationspunktes, bei der das Niveau an Unschärfe erreicht ist, bei dem man dauerhaft ablehnen würde, lesen zu wollen. Die Unschärfe erreicht einen Punkt, an dem sie nicht mehr akzeptabel ist; die Buchstaben oder Testzeichen sind nur noch mutmaßlich erkennbar oder nicht.

Es handelt sich um 36 Messungen pro Person.

**Sicherheitsvorkehrungen:**

Besondere Sicherheitsvorkehrungen müssen nicht getroffen werden, da kein Proband unzumutbaren Strahlexpositionen ausgesetzt wird. Je nach Alter des Probanden kann bei längerem Blick auf den Computerbildschirm ein vorübergehendes Trockenheitsgefühl der Augen oder Konzentrationsschwächen bzw. Müdigkeit auftreten. Sollten unangenehme Erscheinungen während der Messung auftreten, ist dem Betreuer Bescheid zu geben.



### Anamnese der Testperson zur Teilnahme an einer wissenschaftlichen Studie

**Titel der Studie**

„Messung der Sehbereichsbreiten bei Gleitsichtgläsern über Unschärfemarkierung“

**Name der Institution**

Hochschule Aalen, Anton-Huber-Str.23, 73430 Aalen

**Betreuer**

Name, Vorname: Prof. Dr. Baumbach, Peter

**Bachelorand**

Name, Vorname: Kostial, Stephanie

**Testperson**

Name, Vorname:

**Probanden-Nr.**
**Geschlecht:**

☐ männlich ☐ weiblich

**Alter:**

☐ 20-30 ☐ 51-60  
☐ 31-40 ☐ 61-70  
☐ 41-50 ☐ > 70

**Refraktionswerte:**

	sph	cyl	Achse	Add	Visuscc	PD	Ø Pupille
R							
L							

**Korrigiert mit:**

☐ Brille ☐ Kontaktlinsen ☐ keine Sehhilfe

**Korrigiert für:**

☐ Ferne ☐ Nähe ☐ Zwischendistanz

**Gleitsichterfahrung:**

☐ ja ☐ nein

**Motilität:**

☐ frei ☐ eingeschränkt: \_\_\_\_\_

**Vorerkrankungen:**

☐ nein ☐ ja:  
☐ Katarakt ☐ Retinitis Pigmentosa  
☐ Glaukom ☐ Trockenes Auge  
☐ AMD ☐ Sonstige: \_\_\_\_\_

**Medikamente:**

☐ nein ☐ ja: \_\_\_\_\_



**Tätigkeit/ Beruf:** \_\_\_\_\_

**Vorwiegende Arbeitsdistanz:**

☐ 40cm (lesen)   ☐ 50-70cm (PC)   ☐ 80-150cm (Raum)   ☐ > 150cm (Ferne)

1. **Pretest:** Bei welcher der vorliegenden Karten 1-12 setzt bei Ihnen das jeweilige Kriterium für Unschärfe ein?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
bemerkbar												
tolerierbar												
unakzeptabel												

**Bitte bewerten Sie die folgenden Fragen auf einer Skala von 0 bis 5, wobei 0= sehr gering und 5= sehr groß/hoch bedeutet:**

2. Wie hoch schätzen Sie Ihre Toleranzspanne in Bezug auf die Bereitschaft in Alltagssituationen unscharfe/ verschwommene Texte zu lesen bzw. lesen zu können?

	0	1	2	3	4	5
Buch lesen						
PC Arbeit						
Anzeigetafeln (zB. im Bus)						
TV						

**Hinweis: Frage 3 jeweils im Anschluss nach den Messungen zum jeweiligen Testglas stellen!**

3. Wie groß, denken Sie, war der Unterschied in den Markierungseinstellungen zwischen „gerade bemerkbarer“ und „unakzeptable Unschärfe“ bei den jeweiligen Test-Gläsern?

	0	1	2	3	4	5
Testglas 1						
Testglas 2						
Testglas 3						
Testglas 4						

Ich bin Blindtext. Von Geburt an. Es hat lange gedauert, bis ich begriffen habe, was es bedeutet, ein blinder Text zu sein: Man macht keinen Sinn. Man wirkt hier und da aus dem Zusammenhang gerissen. Oft wird man gar nicht erst gelesen. Aber bin ich deshalb ein schlechter Text? Ich weiß,	0,25px
Ich bin Blindtext. Von Geburt an. Es hat lange gedauert, bis ich begriffen habe, was es bedeutet, ein blinder Text zu sein: Man macht keinen Sinn. Man wirkt hier und da aus dem Zusammenhang gerissen. Oft wird man gar nicht erst gelesen. Aber bin ich deshalb ein schlechter Text? Ich weiß,	0,5px
Ich bin Blindtext. Von Geburt an. Es hat lange gedauert, bis ich begriffen habe, was es bedeutet, ein blinder Text zu sein: Man macht keinen Sinn. Man wirkt hier und da aus dem Zusammenhang gerissen. Oft wird man gar nicht erst gelesen. Aber bin ich deshalb ein schlechter Text? Ich weiß,	0,75px
Ich bin Blindtext. Von Geburt an. Es hat lange gedauert, bis ich begriffen habe, was es bedeutet, ein blinder Text zu sein: Man macht keinen Sinn. Man wirkt hier und da aus dem Zusammenhang gerissen. Oft wird man gar nicht erst gelesen. Aber bin ich deshalb ein schlechter Text? Ich weiß,	1,0px
Ich bin Blindtext. Von Geburt an. Es hat lange gedauert, bis ich begriffen habe, was es bedeutet, ein blinder Text zu sein: Man macht keinen Sinn. Man wirkt hier und da aus dem Zusammenhang gerissen. Oft wird man gar nicht erst gelesen. Aber bin ich deshalb ein schlechter Text? Ich weiß,	1,25px
Ich bin Blindtext. Von Geburt an. Es hat lange gedauert, bis ich begriffen habe, was es bedeutet, ein blinder Text zu sein: Man macht keinen Sinn. Man wirkt hier und da aus dem Zusammenhang gerissen. Oft wird man gar nicht erst gelesen. Aber bin ich deshalb ein schlechter Text? Ich weiß,	1,5px

Abbildung 35: Vorlagen Pretest mit Weichzeichnerradius 0,25-1,5 px





Abbildung 36: Vorlagen Pretest mit Weichzeichnerradius 1,75-3,0 px



---

Folgende 250 Wörter wurden für den *Blurtest* als Vorlage verwendet:

Ader Adel Affe Akku Arzt Auto agil aber Ahne Alge Atom acht

Ball Bart Baum Bass Berg Bein Bild blau Boja Brot Burg

Dach Dank dich Duft drei dreh Darm dick dumm Doku Dieb Demo dort

Echo Ecke eben eins Eile Ekel Erde Esel Euro erst

Fall fang Fels fern Feil Filz Flop Flug Frau frei froh Fuge Fuss

Gabe Gans ging gern Glas Glut Golf Gott Grab Graf grau Guss

Haar Haft halb Halm Hand hart Harz Haus Heft Hieb hoch Hupe Horn halt hier

Idee Idol Igel Iglu Iris irre Info Innen isst

Jagd Jahr Joga Jazz Juni Juli jung Judo

Kalk Kalb keim Kern Kind Kino Kiwi Keil klar Koch Kohl Koma Krug Kurs karg

Lang Lauf lahm Leib lese Leim lila Link Loch Lohn

Magd Mais Maus Mann Mark Mehl mein Meer mild Moor mich Mode

Nach Name Napf Narr Nase Neid Nerv Nest neun Note

Oase oben Obst oder Ofen Oper Opus Orte oval Ozon Ober

Paar Pech Pelz Pfad Pilz Plan Puls Plus Polo Pony Pfau Pute Pest Pass

Quer Quad

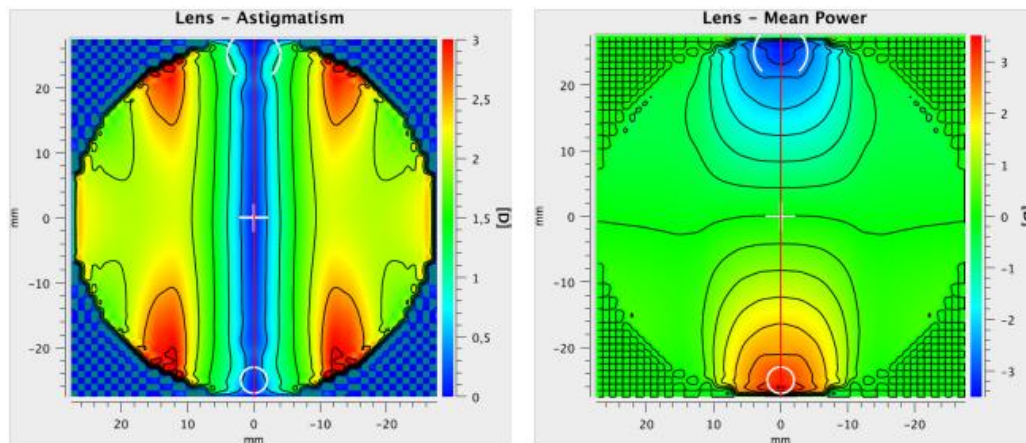


Abbildung 37: Grafische Darstellung Flächenastigmatismus (links) und vertikaler Stärkenanstieg (rechts) Testglas Nr. 1

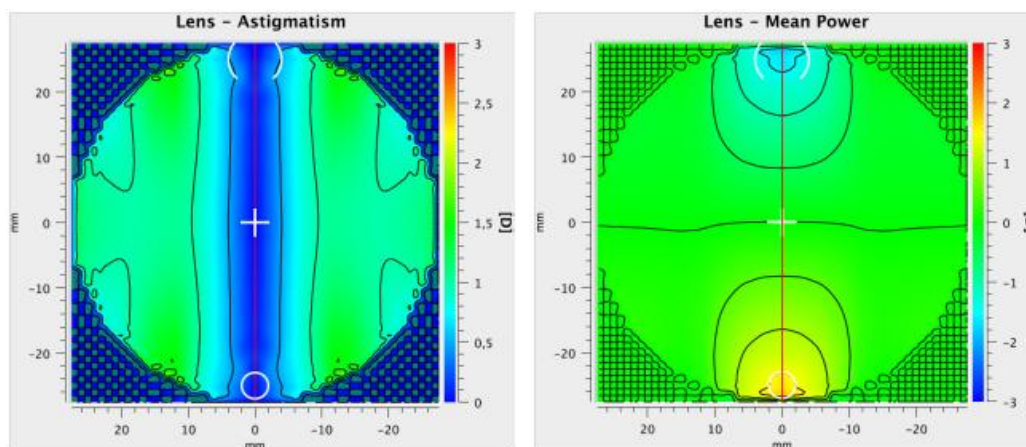


Abbildung 38: Grafische Darstellung Flächenastigmatismus (links) und vertikaler Stärkenanstieg (rechts) Testglas Nr. 3

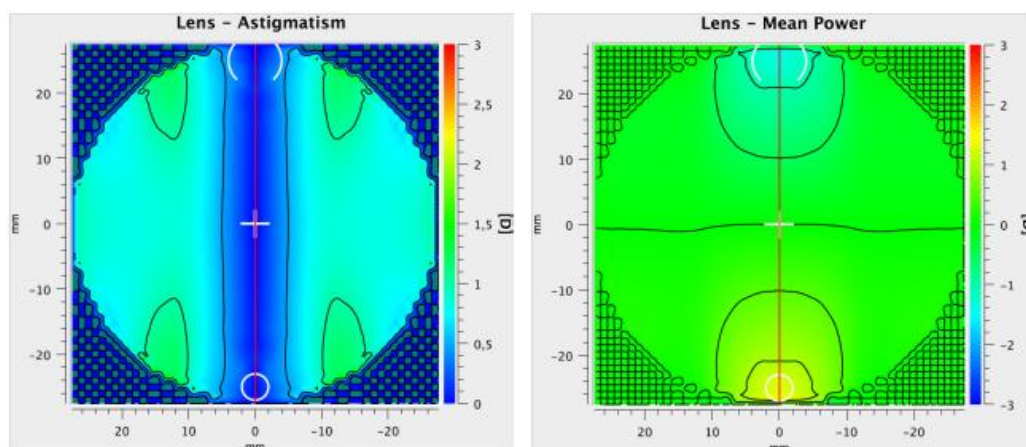
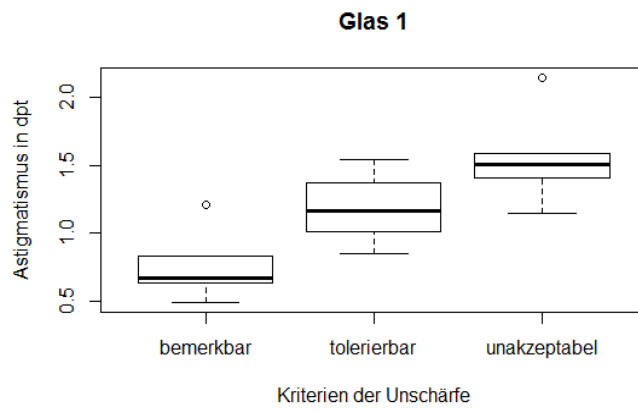
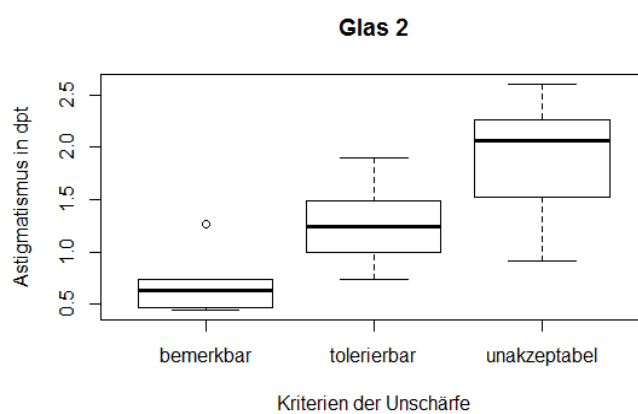


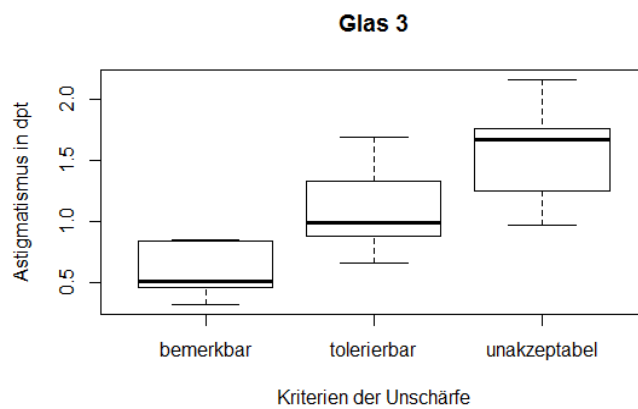
Abbildung 39: Grafische Darstellung Flächenastigmatismus (links) und vertikaler Stärkenanstieg (rechts) Testglas Nr. 4



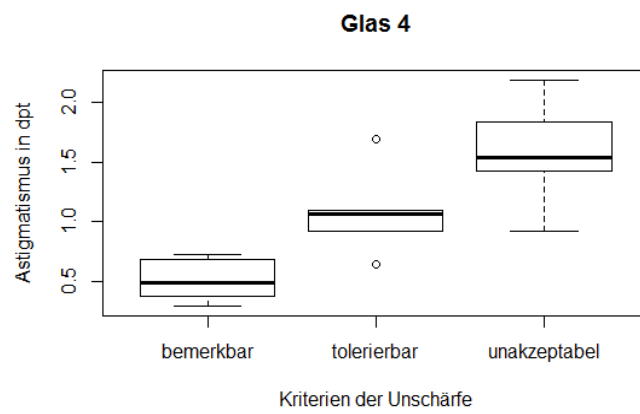
**Abbildung 40: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden Glas 1**



**Abbildung 41: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden Glas 2**



**Abbildung 42: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden Glas 3**



**Abbildung 43: Unschärfegrenzen je Kriterium aller Probanden Glas 4**